Leibniz Online, Nr. 56 (2025)
Zeitschrift der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin e. V.
ISSN 1863-3285 • DOI: 10.53201/LEIBNIZONLINE56

Leibniz Online

Internetzeitschrift
der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin e.V.

Jahrgang 2025 ● Nummer 56
DOI: 10.53201/LEIBNIZONLINE56

Die Zusammenarbeit von Leibniz-Sozietät und Gesellschaft für Kybernetik
(Plenum der Leibniz-Sozietät am 12. Dezember 2024)

Begrüßungen und Auszeichnungen

- *Gerda Haßler:* Eröffnung des Plenums und Begrüßung
- *Hanspeter Loewen:* Begrüßung durch die Gesellschaft für Kybernetik (GfK)
- *Gerhard Pfaff:* Laudatio auf Erdmute Sommerfeld und Werner Krause zur Auszeichnung mit dem Wiener-Schmidt-Preis der Gesellschaft für Kybernetik
- *Erdmute Sommerfeld:* Erinnerung und Dank anlässlich der Verleihung des Wiener-Schmidt-Preises
- *Werner Krause:* Erinnerung und Dank anlässlich der Verleihung des Wiener-Schmidt-Preises

Fachvorträge

- *Hermann Michael Schmidt:* Teleologische Kausalität: Dilthey – Motivator für Hermann Schmidt
- *Siegfried Piotrowski:* Norbert Wiener und die heutige Gesellschaft für Kybernetik

Weitere Beiträge

Adalbert Feltz: Über den Ursprung von Information

Peter J. Plath und Ernst-Christoph Haß: Zur Rolle der Entropieproduktion bei Umweltschäden durch Explosivstoffe

Werner Krause: Erinnerungen an Heinz-Jürgen Rothe: zwischen Arbeits– und Allgemeiner Psychologie. Ein Gedächtnisprotokoll

LO-Redakteur: *Rolf Hecker* r.hecker@leibnizsozietaet.de

Für die Inhalte der Beiträge sind in erster Linie die AutorInnen verantwortlich, sie geben nicht notwendig die Meinung der Leibniz-Sozietät wieder.

Redaktionsschluss: 20. Juni 2025

Leibniz Online, Nr. 56 (2025)
Zeitschrift der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin e. V.
ISSN 1863-3285 • DOI: 10.53201/LEIBNIZONLINE56

Die Zusammenarbeit von Leibniz-Sozietät und Gesellschaft für Kybernetik
(Plenum der Leibniz-Sozietät am 12. Dezember 2024)

Eröffnung des Plenums und Begrüßung

Gerda Haßler
(MLS, Präsidentin)

Veröffentlicht: 20. Juni 2025

Meine sehr geehrten Damen und Herren, liebe Kolleginnen und Kollegen,

ich freue mich sehr, Sie heute zu dieser Plenarveranstaltung in Kooperation mit der Gesellschaft für Kybernetik im Namen der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin e.V. begrüßen zu können. Auch alle online Zugeschalteten begrüße ich sehr herzlich. Im Rahmen dieser Veranstaltung wird der Wiener-Schmidt-Preis der Gesellschaft für Kybernetik an unsere Kollegen Erdmute Sommerfeld und Werner Krause verliehen.

Wir können bereits auf eine über 20-jährige Tradition der Zusammenarbeit mit der Gesellschaft für Kybernetik zurückblicken. Sie begann mit dem Kolloquium „Kybernetik und Interdisziplinarität in der Wissenschaft“, das die Leibniz-Sozietät im November 2002 anlässlich des 90. Geburtstages von Georg Klaus in der Staatsbibliothek durchführte. 2008 folgte das Kolloquium „40 Jahre Kybernetik – eine nach wie vor junge Wissenschaft ?!“ und 2012 eine Tagung unter dem Titel „Kybernetik, Informatik, Logik und Semiotik“. Auch in den Folgejahren fanden die Kybernetik-Aktivitäten in der Leibniz-Sozietät ihre Fortsetzung, zum Beispiel mit der Veranstaltung anlässlich des 80. Geburtstags von Klaus Fuchs-Kittowski zum Thema „Informatik und Gesellschaft – Entstehen von Information, Ermöglichen von Wissen für kreativ lernende Organisationen“. Erinnern möchte ich auch an das gemeinsame Plenum im Oktober 2022 mit dem Vortrag von Vincent Brannigan zum Thema „Disaster on the Man-Machine Interface: The Importance of Cybernetics“ und der Preisverleihung an Klaus Fuchs-Kittowski und Horst Völz, an die Vergabe des Heinz-von-Förster Preises für Organisationskybernetik an Peter Karl Fleissner und Johannes W. Dietrich im April dieses Jahres sowie an weitere Veranstaltungen, die in Kooperation stattfanden.

Wurde bereits auf der ersten gemeinsamen Veranstaltung der Wiener-Schmidt-Preis 2002 der Gesellschaft für Pädagogik und Information und der Gesellschaft für Kybernetik als Würdigung des Lebenswerkes von Friedhart Klix verliehen, der die Auszeichnung für seine Arbeiten im Grenzgebiet von Neurophysiologie, Psychologie und Linguistik unter besonderer Berücksichtigung von Kybernetik und Künstlicher Intelligenz erhielt, so werden heute erneut zwei Psychologen geehrt.

In den heutigen Vorträgen werden wir etwas über Hermann Schmidt und Norbert Wiener, die Namensgeber des zu verleihenden Preises hören. Hermann Schmidt wird in die Tradition der Lebensphilosophie von Wilhelm Dilthey gestellt und Informationen zum Leben Norbert Wieners werden gegeben. Ich danke den beiden Referenten, Hermann Michael Schmidt und Siegfried Piotrowski dafür, dass sie heute sprechen werden.

Die erfolgreiche Zusammenarbeit der Leibniz Sozietät und der Gesellschaft für Kybernetik bereichert unsere Arbeit. Ich freue mich auf die Vorträge und wünsche der heutigen Veranstaltung einen interessanten Verlauf.

E-Mail-Adresse der Verfasserin: gerda.hassler@uni-potsdam.de

Begrüßung durch die Gesellschaft für Kybernetik (GfK)

Hanspeter Loewen
(GfK, Essen)

Veröffentlicht: 20. Juni 2025

Sehr geehrte Frau Haßler, sehr geehrter Herr Pfaff, sehr geehrte Frau Sommerfeld, sehr geehrter Herr Krause, sehr geehrter Siegfried Piotrowski, meine Damen und Herren der Leibniz-Sozietät und der Gesellschaft für Kybernetik, liebe Gäste,

mit großer Freude und sehr herzlich begrüße ich Sie in diesem Jahr schon zum zweiten Mal hier in diesem altehrwürdigen historischen Ratssaal des Rathauses Friedrichshagen im Namen der Gesellschaft für Kybernetik. Vielleicht hat dieser Raum dazu beigetragen, dass unsere Gesellschaft soeben in einer Mitgliederversammlung in fast schon freundschaftlicher Runde die Tagesordnung abarbeiten konnte. Herzlichen Dank an die Leibniz-Sozietät für die freundliche Überlassung dieses Saales.

Wie bereits erwähnt dürfen wir schon zum zweiten Mal in diesem Jahr in Kooperation mit der Leibniz-Sozietät einen Nachmittag erleben, der wiederum Besonderes beschert. Ich darf mich mit Ihnen nicht nur auf die beiden Vorträge freuen, sondern wir dürfen gemeinsam mit der Preisverleihung des Wiener-Schmidt-Preises die beiden Auszuzeichnenden Frau Prof. Dr. Erdmute Sommerfeld und Herrn Prof. Dr. Werner Krause in besonderer Weise ehren.

Die Vergabe des Wiener-Schmidt-Preises, die gemeinsam mit der Leibniz-Sozietät vorbereit, entschieden und organisiert wurde, ist für unsere Gesellschaft nach der Vergabe des Heinz-von-Foerster-Preises im April 2024 das zweite Highlight unserer diesjährigen Arbeit. Es spricht für die Verbundenheit unserer Gesellschaften, dass die Leibniz-Sozietät für die beiden Preise, die zu wesentlichen Teilen auch auf Initiative unseres Präsidenten Herrn Piotrowski durch die damalige Deutsche Gesellschaft für Kybernetik e.V. begründet und in Vergabestatuten niedergelegt wurden, auch eigene großartige Vorschläge gemacht hat. Denen ist die Vergabejury mit uneingeschränkter Zustimmung gefolgt.

„Durch den Wiener-Schmidt-Preis soll eine dokumentierte, wesentliche Einzelleistung oder das wissenschaftliche Lebenswerk der Preisträger gewürdigt werden.“ (Vergabestatut)

Die Stiftung des Preises wurde 1994 vereinbart und bei der Feststunde der Technischen Universität Berlin zum 100. Geburtstag von Norbert Wiener und Herrmann Schmidt am 9. Dezember 1994 verkündet.

Geschätzte Anwesende,

wir sind in der glücklichen Situation, heute wieder gleich zwei Preisträger für ihre hervorragende wissenschaftliche und anwendungsbezogene Arbeit und ihr bisheriges Lebenswerk im Sinne einer kybernetischen Denkweise ehren zu dürfen. Beiden Preisträgern darf ich jetzt schon einmal mit Hochachtung meinen herzlichsten Glückwunsch aussprechen.

Meine Damen und Herren,

eine solche Veranstaltung wie diese zu planen, zu organisieren und schließlich auch durchzuführen, bedeutet sehr viel Engagement und Arbeit. Dafür möchte mich im Namen unserer Gesellschaft bei Allen bedanken, die ihren Teil zum Gelingen dieses Nachmittags beigetragen haben und es jetzt noch tun. Insbesondere Ihnen, lieber Herrn Pfaff, gebührt größter Dank. Bei Ihnen liefen alle Fäden zusammen, die Sie gemeinsam mit Herrn Piotrowski verknüpften. Sie haben entscheidenden Anteil an der Planung und Vorbereitung dieser Feststunde. Ihnen sage ich nochmals herzlichen Dank, dass wir uns als Gast hier so wohl fühlen dürfen.

Schon im April habe ich es gesagt und ich wiederhole mich mit Freude: Die GfK kommt gerne wieder nach Berlin, um mit der Leibniz-Sozietät Gemeinsames zu erleben und zu feiern.

Zum Schluss möchte ich Sie, meine Damen und Herren, soweit sie Interesse an unserer Arbeit haben, einladen, Mitglieder unserer Gesellschaft zu werden. Die Mitgliedschaft in der Leibniz-Sozietät schließt ja nicht die in der Gesellschaft für Kybernetik aus. Mögliche Synergieeffekte lassen grüßen und gemeinsam verschaffen wir uns noch mehr Gehör. Mit unserem Präsidenten ist diese Einladung ausdrücklich abgesprochen worden.

Jetzt aber freue ich mich sehr auf die Festvorträge und die Preisverleihung mit den Laudationes. Ihnen allen wünsche ich eine gute Zeit und jetzt schon frohe Feiertage.

E-Mail-Adresse des Verfassers: hploewen@t-online.de

Laudatio auf Erdmute Sommerfeld und Werner Krause zur Auszeichnung mit dem Wiener-Schmidt-Preis der Gesellschaft für Kybernetik am 12.12.2024

Gerhard Pfaff
(MLS, Berlin)

Veröffentlicht: 20. Juni 2025

Liebe Kollegin Erdmute Sommerfeld, lieber Kollege Werner Krause, liebe Freunde Kolleginnen und Kollegen, sehr geehrte Gäste der heutigen Preisverleihung,

es ist mir eine große Ehre, die Laudatio für zwei heute mit dem Wiener-Schmidt-Preis der Gesellschaft für Kybernetik auszuzeichnende Mitglieder der Leibniz-Sozietät halten zu dürfen. Ich tue das sehr gern, obwohl ich die beiden zu Ehrenden sicher kürzer kenne als viele andere hier Anwesende. In der Zeit meiner relativ kurzen Mitgliedschaft in der Leibniz-Sozietät – ich wurde im Jahr 2018 zugewählt – ergaben sich aber bereits verschiedene sehr

kollegiale Kontakte zu Erdmute Sommerfeld und Werner Krause. Das gab mir die Möglichkeit, beide kennen und schätzen zu lernen und deshalb die Laudatio zu übernehmen.

Erst vor wenigen Monaten, am 30. Mai 2024, wurden Erdmute Sommerfeld und Werner Krause im Rahmen eines Ehrenkolloquiums der Leibniz-Sozietät anlässlich runder Geburtstage geehrt. Allein das zeigt, dass sie zu den besonders aktiven Mitgliedern unserer Gelehrtengesellschaft gehören. Die dort gehaltenen Laudationen haben die wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Leistungen der beiden umfangreich gewürdigt. Natürlich ergeben sich bei der Auszeichnung mit einem Preis der Gesellschaft für Kybernetik weitere Aspekte, die hier genannt werden sollten.

Lassen Sie mich aber bitte hier noch einmal kurz auf die wesentlichen wissenschaftlichen Stationen unserer heutigen Preisträger eingehen:

Erdmute Sommerfeld begann nach dem Studium der Physik an der TH Magdeburg und nach einer Auszeit zur Betreuung ihres Sohnes 1969 ihre Tätigkeit als Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Zentralinstitut für Kybernetik und Informationsprozesse (ZKI) der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin (DAW) in dem von Friedhart Klix geleiteten Bereich "Grundlagen der Kybernetik", der später in den Bereich "Künstliche Intelligenz" und dann in den Bereich „Psychologie“ umbenannt wurde. Zu diesem Bereich gehörte die zunächst von Hubert Sydow und dann von Werner Krause geleitete Abteilung "Analyse und Synthese von Problemlösungsprozessen“.

Im Bereich „Künstliche Intelligenz“ (der Begriff künstliche Intelligenz – im englischen Original artificial intelligence – wurde 1955 geprägt von dem US-amerikanischen Informatiker John McCarthy im Rahmen eines Förderantrags an die Rockefeller-Stiftung für das Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence, einem Forschungsprojekt, bei der sich im Sommer 1956 eine Gruppe von 20 Wissenschaftlern über ca. 8 Wochen mit der Thematik befasste) dieses Instituts promovierte sie 1979, die DAW war inzwischen zur Akademie der Wissenschaften der DDR (AdW) geworden, zum Thema „Analyse und Synthese von Problemlösungsprozessen bei einer Klasse von Zerlegungsproblemen“ und war von 1985 bis 1991 Leiterin der Abteilung „Mathematische Modellierung und Simulation kognitiver Prozesse“.

Nach Abwicklung der Akademie 1991 wurde ihre Projektgruppe „Mathematische Psychologie“ zunächst durch das Hochschulerneuerungsprogramm der Bundesregierung und der ostdeutschen Länder gefördert.

1993 habilitierte sich Erdmute Sommerfeld mit einer Arbeit zum Thema „Mathematisch-psychologische Analyse der Ausbildung und Transformation kognitiver Strukturen“ an der Mathematisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Humboldt-Universität zu Berlin (HUB).

1994 wurde sie auf die Dozentur „Methoden der Psychologie“ der Universität Leipzig berufen und 2003 zur außerplanmäßigen Professorin ernannt. Bis zum Eintritt in den Ruhestand war sie dort als Hochschullehrerin tätig. Seit 2004 ist Erdmute Sommerfeld Mitglied der Leibniz-Sozietät. In den Jahren von 2006 bis 2010 war sie Sekretar des Plenums unserer Gelehrtengesellschaft. Für ihr großes Engagement erhielt sie 2014 die Daniel-Ernst-Jablonski-Medaille der Leibniz-Sozietät.

Werner Krause begann nach seinem Studium an der TU Ilmenau (damals Hochschule für Elektrotechnik) in den Fachrichtungen Medizinische Elektronik, Radiologische Technik und Theoretische Physik 1962 eine Tätigkeit als wissenschaftlicher Assistent am Hirnforschungsinstitut der damaligen Karl-Marx-Universität Leipzig. Anschließend ging er an das Psychologische Institut der Humboldt-Universität zu Berlin (HUB), welches seit 1962 von Friedhardt Klix geleitet wurde. Dort promovierte er 1969 und wechselte danach in das

neu gegründete Zentralinstitut für Kybernetik und Informationsprozesse (ZKI) der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin (DAW). Hier leitete Werner Krause wenig später die Abteilung „Problemlöseprozesse", die ein wichtiger Baustein für die Planung eines von Klix anvisierten „Zentralinstituts für Psychologie" an der Akademie der Wissenschaften der DDR (AdW) darstellte. Seine Habilitation erlangte er 1978 ebenfalls an der HUB.

Das „Zentralinstitut für Psychologie" kam aber zunächst nicht zum Laufen. So folgte Werner Krause 1987 dem Ruf auf den Lehrstuhl „Allgemeine Psychologie II" der Friedrich-Schiller-Universität Jena. Hier wollte er zunächst nur für 2 Jahre bleiben. Daher sagte er Friedhardt Klix zu, als dieser bei ihm Ende 1988 nachfragte, ob er die Leitung des weiterhin ins Auge gefassten Akademieinstituts übernehmen würde. Werner Krause entwickelte hierfür eine Konzeption, die einerseits wissenschaftliche Fragestellungen verschiedener Disziplinen vereinte (in dem neuen Institut sollte quasi die Forschung „vom Neuron zum Verhalten" in einem Haus stattfinden) als auch Anwendungsaspekte beinhaltete. Das Akademieinstitut wurde 1990 gegründet. Nur 3 Monate später wurde die AdW „abgewickelt", wie es im zweifelhaften Sprachgebrauch der Wendezeit hieß. Werner Krause hatte das Glück, am Lehrstuhl „Allgemeine Psychologie" der Universität Jena weiterhin seiner Lehrtätigkeit nachkommen zu können. Es folgten zudem mehrere Gastprofessuren in Fribourg (Schweiz) und in Würzburg.

In den Jahren 1990 bis 1992 wurde er von der Universität Jena zum Dekan der Fakultät für Sozial- und Verhaltenswissenschaften berufen. Doch statt Weiterentwicklung, Forschung und Zukunftsorientierung an der Fakultät ging es zunächst einmal um Abwicklung, Umbruch und auch Zusammenbruch der bisherigen Strukturen, betroffen war natürlich auch das Institut für Psychologie – eine sehr schwierige und emotional belastende Phase für Werner Krause, aus der er aber mit neuem Elan hervorging. Er lehrte insgesamt 16 Jahre an der Universität Jena. Seit 1999 ist er Mitglied der Leibniz-Sozietät.

Wenn man beide Lebensläufe vergleicht, dann fällt schnell auf, dass sich Erdmute Sommerfeld und Werner Krause um das Jahr 1969 im Zentralinstitut für Kybernetik und Informationsprozesse (ZKI) in der Abteilung „Problemlöseprozesse" das erste Mal begegnet sein müssen – Werner Krause als Leiter der Abteilung und Erdmute Sommerfeld als Wissenschaftliche Mitarbeiterin. Gemeinsam arbeiteten beide an Grundlagenthemen mit engem Bezug zur Kybernetik, Künstlichen Intelligenz und Psychologie. Ein Teil dieser Themen hat die beiden das ganze wissenschaftliche Leben begleitet. Seit Anfang der 1970er Jahre publizierten sie gemeinsam die Ergebnisse ihrer Forschungsarbeiten. Frühe Veröffentlichungen betreffen eine denkpsychologische Analyse beim Entwurf von Leiterplatten (1974) und experimentalpsychologische Untersuchungen zur Lösung eines Zerlegungsproblems (1975). In den 1980er Jahren erschienen gemeinsame Arbeiten zum experimentellen Nachweis kognitiver Strukturen in einfachen Problemlösungsprozessen (1986, 1987) und zur aufwandsminimierenden Umstrukturierung von Wissensstrukturen der Konstruktion im menschlichen Gehirn (1989). Die lange Reihe gemeinsamer Veröffentlichungen lässt sich über die 1990er und 2000er Jahre bis heute fortsetzen. Erst in allerjüngster Zeit sind gemeinsame Arbeiten von Werner Krause und Erdmute Sommerfeld zu den Themen „Universalien des Denkens und Entropiereduktion im Denken" (2022) und „Ordnungsbildung und Einfachheit" erschienen.

Natürlich entwickelten sich bei den beiden heute zu Ehrenden im Laufe der wissenschaftlichen Tätigkeit unterschiedliche Schwerpunkte.

Bei Erdmute Sommerfeld wurde das Themenfeld „Repräsentation, Interpretation und Reduktion struktureller Information in der menschlichen Informationsverarbeitung" zentral in ihren Arbeiten. In Zusammenarbeit mit Fred Sobik hat sie einen Ansatz zur Bestimmung

des strukturellen Informationsgehaltes entwickelt, der wiederum die Grundlage für ihren Modellansatz zur Systematisierung, Formalisierung und Bewertung von Denkoperationen bildete. Diese Systematik erlaubt eine Vollständigkeitsbetrachtung. Damit wurde eine Grundlage dafür geschaffen, dass die Menge aller unter bestimmten Bedingungen möglichen bildbaren internen Repräsentationen (kognitiven Strukturen) vollständig charakterisiert werden kann.

Werner Krauses spezielles Interesse galt und gilt bis heute in starkem Maße dem Thema „Entropie in der menschlichen Informationsverarbeitung". In Zusammenarbeit mit Gundula Seidel, Bärbel Schack und Frank Heinrich konnte er zeigen, dass die Entropiereduktion – bestimmt aus EEG-Mikrozustandssequenzen – der geistigen Leistung – ausgedrückt durch eine langfristige Lehrereinschätzung – direkt proportional ist. Daraus lässt sich ein objektives Maß für geistige Leistungen entwickeln. Für die von Friedhart Klix eingeführte mentale Grammatik wurde eine Methode zum experimentellen Nachweis von mentalen Regeln entwickelt. Die Anzahl solcher Regeln wird durch die Systematik kognitiver Strukturtransformationen von Erdmute Sommerfeld mitbestimmt.

Beide Schwerpunktthemen, aber auch weitere von beiden aufgegriffene Forschungsansätze haben einen engen Bezug zur Kybernetik. Die als die Wissenschaft der Steuerung und Regelung von Maschinen und deren Analogie zur Handlungsweise von lebenden Organismen (aufgrund der Rückkopplung durch Sinnesorgane) und sozialen Organisationen (aufgrund der Rückkopplung durch Kommunikation und Beobachtung) definierte Kybernetik findet sich in vielfältiger Weise in den Arbeiten und Publikationen von Erdmute Sommerfeld und Werner Krause. Wie Werner Krause in seinen Dankesworten auf dem Ehrenkolloquium der Leibniz-Sozietät im Mai 2024 anmerkte, holten sich die beiden bei ihren Arbeiten aber auch Anleihen in den Bereichen Psychophysik, Physik und Medizin. Die damit verbundene interdisziplinäre Denk- und Arbeitsweise ist kennzeichnend für die beiden heutigen Preisträger. Diesbezüglich haben sie in der Leibniz-Sozietät günstige Voraussetzungen für ihre bis heute andauernde wissenschaftlich Tätigkeit gefunden. Gemeinsam mit Herbert Hörz gründeten sie 2010 in der Leibniz-Sozietät den Arbeitskreis „Einfachheit als Wirk-, Erkenntnis- und Gestaltungsprinzip", in dem sich eine interdisziplinär zusammengesetzte Gruppe von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern in den folgenden Jahren bis 2020 mit der Frage beschäftigt hat, ob Einfachheit ein universelles Prinzip der Wirkung, ein universelles Prinzip zum Erkennen sowie ein universelles Prinzip zum Gestalten in den unterschiedlichsten Disziplinen der Wissenschaft ist. Hier bot sich auch die Möglichkeit, zu überprüfen, ob ein – in der Denkpsychologie experimentell nachgewiesenes – bereichsübergreifendes Prinzip der Aufwandsreduktion auch in anderen Fachdisziplinen eine bedeutsame Rolle spielt, und wenn ja, ob es disziplinübergreifende Merkmale gibt. Aus einer ersten Analyse der Beiträge im Arbeitskreis mit Bezug zur Literatur resultieren Beispiele, die dafürsprechen, dass die Schaffung von Voraussetzungen für einfache Lösungsprozesse ein disziplinübergreifendes Prinzip ist.

Sehr gern nutze ich nun die heutige Auszeichnung mit dem Wiener-Schmidt-Preis der GfK, liebe Erdmute Sommerfeld und lieber Werner Krause, um Ihnen alles Gute, die bestmögliche Gesundheit, Freude am selbstbestimmten Schaffen und die Kraft für eine lange anhaltende schöpferische und anregende Teilnahme am wissenschaftlichen, kulturellen und gesellschaftlichen Leben zu wünschen.

E-Mail-Adresse des Verfassers: pfaff.pigmente@gmx.de

Erinnerung und Dank anlässlich der Verleihung des Wiener-Schmidt-Preises am 12.12.2024

Erdmute Sommerfeld
(MLS, Berlin)

Veröffentlicht: 20. Juni 2025

Sehr geehrte Frau Präsidentin der Leibniz-Sozietät, sehr geehrter Herr Präsident der Gesellschaft für Kybernetik, sehr geehrte Gäste, liebe Kolleginnen und Kollegen,

für die heutige Auszeichnung mit dem Wiener-Schmidt-Preis möchte ich mich vielmals bedanken. Ich freue mich sehr darüber. Auch ist es eine besondere Freude, dass Sie, sehr geehrter Herr Schmidt, Sohn von Hermann Schmidt, heute einen Vortrag gehalten haben. Ihnen, sehr geehrter Herr Pfaff, gilt mein herzlicher Dank für die Würdigung meiner wissenschaftlichen Arbeit.

Mein Interesse an der Kybernetik nahm konkrete Formen an nach meinem Vorstellungsgespräch bei Friedhart Klix im Jahre 1969. Daraufhin begann ich meine Tätigkeit in dem von Friedhart Klix geleiteten Bereich „Grundlagen der Kybernetik" des Zentralinstituts für Kybernetik und Informationsprozesse (ZKI) in der Akademie der Wissenschaften zu Berlin.

Gründungsdirektor des ZKI war Horst Völz. Eines seiner wichtigsten Forschungsgebiete betraf und betrifft die Theorie der Information und Kommunikation (Völz 1982, 2001).

Schwerpunkt der wissenschaftlichen Arbeiten im Bereich von Friedhart Klix waren Untersuchungen zur **menschlichen Informationsverarbeitung mit Bezug zur Künstlichen Intelligenz**. Eine wesentliche Grundlage dafür bildete das Buch von Friedhart Klix „Information und Verhalten. Kybernetische Aspekte der organismischen Informationsverarbeitung" (Klix 1971).

Gerhard Pfaff hat heute in der Laudatio das Themenfeld angesprochen, das meine wissenschaftliche Arbeit besonders geprägt hat: „Interpretation, Repräsentation und Reduktion struktureller Information".

Menschliche Informationsverarbeitung ist ein aktiver, vom Empfänger determinierter Prozess. Dabei handelt es sich meist um die **Verarbeitung struktureller Information**. Strukturelle Information ist insbesondere durch Beziehungen zwischen ihren Elementen gekennzeichnet – z.B. durch grammatikalische Relationen zwischen den Worten eines Textes, durch räumliche Relationen zwischen den Teilen eines Bildes oder auch durch Beziehungen zwischen Personen.

Strukturelle Information kann sowohl extern als auch intern repräsentiert (getragen) werden. Träger struktureller Information ist extern z.B. ein Text oder ein Bild und intern eine kognitive Struktur.

Extern gegebene Information kann durch den Menschen unterschiedlich **interpretiert** und damit auch intern (mental) unterschiedlich **repräsentiert** werden.

Im Rahmen der Psychologie wurde auf die bedeutende Rolle der Interpretation von Information zuerst von Untersuchungen in der Wahrnehmungspsychologie her aufmerksam gemacht, die Bedeutung dieses Aspektes wurde dann auch für Gedächtnis- und Denkprozesse unterstrichen (Klix 1962, Feger 1972, Prinz 1983, Opwis/Lüer 1996). Klaus Opwis und Gerd Lüer zeigen auf, dass der Aufbau interner Repräsentationen eine aktive Rekonstruktion oder sogar Konstruktion der Außenwelt darstellt. Herbert Hörz hebt hervor,

dass im philosophischen Informationsbegriff keine Gleichheit zwischen Abbild und Urbild postuliert wird (Hörz 1984, 1996). Mit Bezug dazu sind die Untersuchungen von Peter Karl Fleissner und Wolfgang Hofkirchner zu Informationsstrukturen von Bedeutung. Darin wird herausgearbeitet, dass der Prozess der Gewinnung von Wissen keine spiegelbildliche Wiedergabe der Realität ist, sondern eine Sichtung der Daten, die durch eine bestimmte „Brille" vorgenommen wird (Fleissner/Hofkirchner 1995).

Die Interpretation von Information kann über die Anforderung hinaus durch weitere Faktoren beeinflusst werden, z.B. durch den Kontext oder das Vorwissen sowie durch persönlichkeitsspezifische und motivationale Faktoren. Das bedeutet: Bei der (formalen und experimentellen) Erfassung von Interpretationen müssen neben dem metrischen und strukturellen Aspekt der Information insbesondere auch der semantische und der pragmatische Aspekt berücksichtigt werden (vgl. z.B. Kornwachs 2022). Das gilt auch für die Gestaltung sozio-technischer Systeme. Weiterführend dazu sind Arbeiten von Klaus Fuchs-Kittowski und Christian Stary. In ihrem Beitrag zur Tagung „Cyberscience – Wissenschaftsforschung und Informatik" betonen sie (Zitat): „Information ist (…) nicht als unmittelbare Widerspiegelung (Abbild) zu verstehen, sondern, wie wir mit unserem Informationskonzept herausgearbeitet haben, der Prozess der Wahrnehmung setzt am Abbild an, dies wird zur Struktur mit Bedeutung abstrahiert" (Stary/Fuchs-Kittowski 2022).

Es muss sich somit auch in einem theoretischen Ansatz widerspiegeln, dass menschliche Informationsverarbeitung ein aktiver, vom Empfänger determinierter Prozess ist. Das macht die Formalisierung von Interpretationen bei der Abbildung bzw. Rekonstruktion oder Konstruktion der Außenwelt in eine interne Repräsentation (kognitive Struktur) erforderlich.

Für die Wahrnehmungspsychologie hat der Ansatz zur „Strukturellen Informationstheorie" von Emanuel l. J. Leeuwenberg eine besondere Bedeutung (Leeuwenberg 1968). Er hat ein Komplexitätsmaß für Wahrnehmungsprozesse entwickelt, das auf einem minimalen Code basiert, auf dessen Grundlage die interne (kognitive) Struktur des wahrgenommenen Musters erzeugt werden kann.

Ausgehend vom Grundgedanken der Strukturellen Informationstheorie von Leeuwenberg für die Wahrnehmungspsychologie habe ich in Zusammenarbeit mit Fred Sobik für die Gedächtnis- und Denkpsychologie ein **Interpretationssystem zur Bestimmung des strukturellen Informationsgehaltes** entwickelt (Sommerfeld/Sobik 1994). Der strukturelle Informationsgehalt ist im Gegensatz zu Shannons Informationsmaß (Shannon/Weaver 1976) und Leeuwenbergs Komplexitätsmaß keine Zahl, sondern wird charakterisiert durch eine Menge von Interpretationen. Solche Interpretationen können z.B. beliebige Sätze einer natürlichen Sprache oder auch eingeschränkte relationale Aussagen sein. Zur Formalisierung einer Struktur als Träger struktureller Information und zur Formalisierung von Strukturtransformationen haben wir die Graphentheorie verwendet. Interessant und hilfreich dafür waren die Diskussionen mit dem Graphentheoretiker Horst Sachs und seinen Mitarbeitern – insbesondere zu eigenschaftsstabilen Graphtransformationen (Sachs 1970).

Das Interpretationssystem bildete eine wesentliche Grundlage für die Entwicklung meines **Modellansatzes zur Systematisierung, Formalisierung und Bewertung kognitiver Strukturtransformationen**. Dieser Modellansatz erlaubt eine Vollständigkeitsbetrachtung von Denkoperationen (Sommerfeld 1994, 2014). Er diente zum experimentellen Nachweis der aufwandsreduzierenden Strukturierung lösungsrelevanter Information (Krause 2000, Krause/Sommerfeld 2024) und zum experimentellen Nachweis von spezifischen interregionalen Differenzen der EEG-Kohärenz als Indikatoren für Differenzen in der Komplexität lösungsrelevanter Information (vgl. z.B. Dörfler et al. 2001, Simmel et al. 2001, Köhler et al. 2002).

Stellvertretend für alle, mit denen ich zusammengearbeitet und diskutiert habe, gilt heute mein Dank den Kolleginnen und Kollegen, von deren Ideen und konstruktiver Kritik ich in meiner wissenschaftlichen Arbeit besonders profitiert habe:

Fred Sobik für die Zusammenarbeit an der Akademie der Wissenschaften bei der mathematischen Modellierung zur Entwicklung des Interpretationssystems für strukturelle Information,

Werner Krause für die Zusammenarbeit an der Akademie der Wissenschaften, sowie zwischen den Universitäten Jena und Leipzig und anschließend in der Leibniz-Sozietät zum experimentellen Nachweis der aufwandsreduzierenden Strukturierung lösungsrelevanter Information und zur Überprüfung der Allgemeingültigkeit des Prinzips der Aufwandsreduktion,

meiner Forschungsgruppe an der Universität Leipzig, bestehend aus Tobias Dörfler, Anke Hensel, Katharina Köhler (geb. Buchta), Michael Köhler, Franziska Kopp, Simone Malotinsky, Christoph Markert, Robert Pies, Edith Schlacher, Frank-Michael Schleif und Andrea Simmel (geb. Hildebrandt), für die Zusammenarbeit zum experimentellen Nachweis von spezifischen Differenzen der EEG-Kohärenz als Indikatoren für Differenzen in der Komplexität lösungsrelevanter Information,

Klaus Fuchs-Kittowski für anregende Diskussionen in der Leibniz-Sozietät zur Kybernetik im Allgemeinen und zum Informationsbegriff im Besonderen – insbesondere in der Zeit unserer gemeinsamen Teilnahme an den Sitzungen der Gesellschaft für Kybernetik in den Jahren 2006 bis 2009,

Herbert Hörz für 10 Jahre Zusammenarbeit im Arbeitskreis „Prinzip Einfachheit" in der Leibniz-Sozietät sowie für konstruktive Diskussionen zur Spezifizierung des philosophischen Informationsbegriffs von Herbert Hörz aus Sicht der menschlichen Informationsverarbeitung.

Sehr geehrter Herr Präsident der Gesellschaft für Kybernetik, lieber Herr Piotrowski, sehr geehrte Frau Präsidentin der Leibniz-Sozietät, liebe Frau Haßler, sehr geehrter Herr Sekretar der Klasse Naturwissenschaften und Technikwissenschaften der Leibniz-Sozietät, lieber Herr Pfaff: Zum Abschluss möchte ich mich noch einmal für die heutige Plenarveranstaltung ganz herzlich bedanken.

Bibliographie

Dörfler, Tobias/Simmel, Andrea/Schleif, Frank-Michael/Sommerfeld, Erdmute (2001): „Complexity-dependent synchronization of brain subsystems during memorization". *Fechner Day 2001: The 200th Birthday of Gustav Theodor Fechner*, hrsg. von Erdmute Sommerfeld/Raul Kompass/Thomas Lachmann. Lengerich, Berlin: Pabst Science Publishers, 343-348.

Feger, Hubert (1972): *Skalierte Informationsmenge und Eindrucksurteil*. Bern: Huber.

Fleissner, Peter Karl/Hofkirchner, Wolfgang (1995) „Informatio revisited. Wider den dinglichenInformationsbegriff". *Informatik Forum* (8) 3, 126–131.

Hörz, Herbert (1984): „Information und Weltanschauung". *Pädagogische Forschung, Wissenschaftliche Nachrichten* 25 (1984) 2, 13–25.

Hörz, Herbert (1996): „Reflections on a philosophical notion of information". *Information. New Questions to a Multidisciplinary Concept*, hrsg. von Klaus Kornwachs/Konstantin Jacoby. Berlin: Akademie-Verlag, 245–257.

Klix, Friedhart (1962): *Elementaranalysen zur Psychophysik der Raumwahrnehmung*. Berlin: DVW.

Klix, Friedhart (1971): *Information und Verhalten*. Berlin: DVW.

Köhler, Michael/Buchta, Katharina/Schleif, Frank-Michael/Sommerfeld, Erdmute (2002): "Complexity and difficulty in memory based comparison", *Fechner Day 2002*, hrsg. von Jose A. da Silva/Elton H. Matsushima/Nilton P. Ribeiro-Filho. Rio de Janeiro, RJ, Brazil: The International Society for Psychophysics, 433–439.

Kornwachs, Klaus (2022): „Zur Systemtheorie des Lesens und Schreibens – *Skizze einer Theorie der Pragmatischen Information". Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin.* Berlin: trafo Verlag, Bd. 150/151, 103–123. https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2022/10/1556004b.pdf

Krause, Werner (2000): *Denken und Gedächtnis aus naturwissenschaftlicher Sicht*. Göttingen: Hogrefe.

Krause, Werner/Sommerfeld, Erdmute (2024): „Ordnungsbildung und Einfachheit. 60 Jahre interdisziplinäre Forschung am Beispiel der Elementaranalyse menschlicher Informationsverarbeitung". *Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin*, Berlin: trafo Verlag, Bd. 161, 13–52. https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2024/08/SB161.pdf

Leeuwenberg, Emanuel I. J. (1968): *Structural Information of Visual Patterns*. Paris: Mouton & Co.

Opwis, Klaus/Lüer, Gerd (1996): „Modelle der Repräsentation von Wissen". *Enzyklopädie der Psychologie*, Ser. 2, Kognition, Bd. 4, Gedächtnis, hrsg. von Dietrich Albert/Kurt H. Stapf, Göttingen, Toronto: Hogrefe, 337–431.

Prinz, Wolfgang (1983): *Wahrnehmung und Tätigkeitssteuerung*. Göttingen, Toronto: Hogrefe.

Sachs, Horst (1970): *Einführung in die Theorie der endlichen Graphen*. Leipzig: Teubner.

Shannon, Claude Elwod/Weaver, Warren (1976): Mathematische Grundlagen der Informationstheorie. München: Oldenburg.

Simmel, Andrea/Dörfler, Tobias/Schleif, Frank-Michael/Sommerfeld, Erdmute (2001): "An analysis of connections between internal and external learning process indicators using EEG coherence duration". F*echner Day 2001: The 200th Birthday of Gustav Theodor Fechner*, hrsg. von Erdmute Sommerfeld/Raul Kompass/Thomas Lachmann. Lengerich, Berlin: Pabst Science Publishers, 602–607.

Sommerfeld, Erdmute/Sobik, Fred (1994): "Operations on cognitive structures – their modelling on the basis of graph theory". *Knowledge Structures*, hrsg. von Dietrich Albert. Berlin: Springer, 146–190.

Sommerfeld, Erdmute (1994): *Kognitive Strukturen*. Münster, New York: Waxmann.

Sommerfeld, Erdmute (2014): „Strukturelle Information: Repräsentation, Interpretation, Reduktion." *Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin.* Berlin: trafo Verlag, Bd. 118, 91–104. https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2014/-02/10_sommerfeld.pdf.

Stary, Christian/Fuchs-Kittowski, Klaus (2022): „Zur Methodologie sozio-technischer Informationssystem- und Arbeitsgestaltung". *Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin*. Berlin: trafo Verlag, Bd. 150/151, 79–102. https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2022/10/1556004b.pdf

Völz, Horst (1982): I*nformation I. Studie zur Vielfalt und Einheit der Information*. Berlin: Akademie-Verlag.

Völz, Horst (2001): *Wissen – Erkennen – Information. Allgemeine Grundlagen für Naturwissenschaft, Technik und Medizin.* Aachen: Shaker Verlag.

E-Mail-Adresse der Verfasserin: erdmute.sommerfeld@t-online.de

Erinnerung und Dank anlässlich der Verleihung des Wiener-Schmidt-Preises am 12.12.2024

Werner Krause
(MLS, Berlin)

Veröffentlicht: 20. Juni 2025

Sehr geehrte Frau Präsidentin der Leibniz-Sozietät, sehr geehrter Herr Präsident der Gesellschaft für Kybernetik, lieber Herr Pfaff, sehr geehrte Gäste, liebe Kolleginnen und Kollegen,

für die Verleihung des Wiener-Schmidt-Preises bedanke ich mich sehr herzlich, auch im Namen meiner Jenenser Kollegen und Freunde Gundula Seidel, Bärbel Schack, Uwe Kotkamp, Frank Heinrich, Anita Kramer, Gunter Kramer, Christine Schleussner und Gert Grießbach, und auch im Namen meiner Kollegen und Freunde Wilfried Gundlach in Berlin, Martin Grunwald in Leipzig, Steffen Theilemann in Potsdam und Philipp Mirtschink in Bautzen.

Häufig spielte bei den hier zur Debatte stehenden Themen die Frage der Information, ihre Definition, ihre Eigenschaften, ihre Messung und Bewertung eine wichtige Rolle. Ich denke an Namen wie Helmar Frank, Friedhart Klix, Horst Völz und Klaus Fuchs Kittowski.

Unsere Vorgehensweise war auf einen anderen Aspekt gerichtet: nämlich auf die Frage, ob in den Naturwissenschaften bekannte allgemeine Gesetze und Prinzipien auch in der menschlichen Informationsverarbeitung gelten.

Eine Anleihe aus der Regelungstechnik:

Bei Prof. Reinisch, einem Kindlerschüler, hörte ich in der Vorlesung über Regelungstechnik 1959 zum ersten Mal etwas von einem Rückkopplungsprinzip. Die Regelkreisgleichung schrieb er damals noch mit Kreide an die Tafel. Dieses Rückkopplungsprinzip: eine Regelabweichung soll möglichst rasch zu Null werden, war für uns ein bedeutendes Prinzip, aber natürlich nur im Bereich der Technik, z.B. zur Temperaturregelung.

Am Institut von Prof. Klix einige Zeit später lernte ich Klaus-Peter Timpe kennen, der Untersuchungen zum Thema „Der Mensch als Regler“ durchführte. Es war die gleiche Fragestellung wie damals in der Regelungstechnikvorlesung, wie schnell wird bei einem Rückkopplungsprinzip die Regelabweichung zu Null und von welchen Eigenschaften hängt das ab, nur diesmal betraf es einen anderen Orientierungsbereich: die menschliche Informationsverarbeitung.

Die Methode des Fragens nach Prinzipien ließ sich von einem Wissensgebiet auf ein anderes übertragen.

Eine Anleihe aus der Physik:

Bei der Analyse von Denkprozessen fiel uns eine Arbeit von Aebli auf.“ Denken, das Ordnen des Tuns.“ Denken als Ordnungsbildung aufzufassen hatte dann zur Folge, aus der Physik bekannte Maße zum Unordnungsabbau oder zur Ordnungsbildung auf die menschliche Informationsverarbeitung zu übertragen. So konnten wir die Entropiereduktion im Denkprozess direkt messen und zeigen: es gilt (entgegen dem 2. Wärmehauptsatz der Thermodynamik) $dS/dt < 0$, so wie es der Quantenphysiker Erwin Schrödinger in seinem berühmten Vorlesungen 1943 in Dublin postuliert hatte. Wir hatten im Kolloquium im Mai darüber gesprochen: Denkleistungen sind also objektiv messbar und berechenbar.
Eine Anleihe aus der Psychophysik.

Alle psychischen Erscheinungsformen basieren auf nervalen Strukturen. Will man die Denkleistung darauf zurückführen, muss man den Zusammenhang zwischen diesen externen und internen Größen kennen. In der Psychophysik wird eine psychophysische Funktion zwischen internen und externen Größen (z.B. zwischen Reiz und Empfindung) betrachtet.

In analoger Weise konnten wir eine neurophysische Funktion zwischen der Aktivationsdauer eines bestimmten am Lösungsprozess beteiligten kortikalen Areals und der Lösungszeit beim Lösen eines mathematischen Problems bestimmen: die Funktion ist umgekehrt proportional: je länger ein für dieses mathematische Problem ausgezeichnetes kortikales Areal aktiv ist, umso kürzer die Lösungszeit für dieses mathematische Problem. Nun ist das keineswegs überraschend.

Bemerkenswert aber ist die topologische Unterscheidung: von 30 Messpunkten über dem Kortex findet sich dieser funktionale Zusammenhang nur über einem Messpunkt. Das ist genau über jenem kortikalen Areal, in dem die für die Lösung notwendige kognitive Operation ausgeführt wird: Denkleistungen sind also auf ihre neuronalen Strukturen zurückführbar.

Mit dieser Methode können nicht nur kognitive Operationen, wie sie in der Systematik von Erdmute Sommerfeld vorkommen, experimentell nachgewiesen werden, sondern auch Regeln einer mentalen Grammatik, wie sie Friedhart Klix postuliert hat.

Diese Übertragung von Prinzipien von einer Disziplin auf eine andere, die für unsere Forschungen kennzeichnend war, ist auch der Kybernetik eigen.

Dem Vorstand der Gesellschaft für Kybernetik danke ich – auch im Namen meiner Kollegen – nochmals sehr herzlich für diesen Preis und Ihnen, lieber Herr Pfaff, ganz herzlichen Dank für die Laudatio.

E-Mail-Adresse des Verfassers: urwe.krause@t-online.de

Leibniz Online, Nr. 56 (2025)

Zeitschrift der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin e. V.
ISSN 1863-3285 • DOI: 10.53201/LEIBNIZONLINE56

Teleologische Kausalität: Dilthey – Motivator für Hermann Schmidt

H. Michael Schmidt
(Versmold)

Veröffentlicht: 20. Juni 2025

Die Kybernetik, angetreten als fächerübergreifende Theorie von Steuerung und Regelung (N. Wiener, R. Ashby, G. Klaus, H. Schmidt) vertritt im Grunde zwei ganz verschiedene Anliegen. Auf der einen Seite will die Kybernetik Universalwissenschaft sein mit der Kraft, in die Einzelfächer hineinzuwirken und dort neue Verbindungen zu stiften. Man muss wohl sagen, diesen Anspruch hat sie kaum erfüllt. Auf der anderen Seite haben Kybernetiker versucht, die Beziehung zwischen dem Menschen und der von ihm geschaffenen Technik philosophisch neu zu deuten, der Technik einen Wert für das Selbstbild des Menschen zu geben. Diesen zweiten Anspruch macht die „Allgemeine Regelkreislehre" von Hermann Schmidt geltend.

Der folgende Beitrag behauptet, dass der Ansatz von Schmidt zur Technikphilosophie Begriffe und Denkweisen aus der Lebensphilosophie von Wilhelm Dilthey (1833–1911) übernimmt. Tatsächlich und erstaunlicherweise, hat Schmidt den Namen Dilthey in seinen gedruckten Arbeiten nicht genannt. Indessen aber war es so, dass der junge Schmidt gegen Ende seines Göttinger Physikstudiums über Dilthey viel gehört hat, nämlich bei dem Philosophen Georg Misch, der damals auch Herausgeber von Dilthey-Bänden war (Dilthey 1924, 1927, 1934, 1961). In Diltheys Ges. Schriften, Band VII, heißt es etwa, durchaus nah den Begriffen von Schmidt: Die Geschichte zeigt, wie die Wissenschaften, die sich auf den Menschen beziehen, in einer beständigen Annäherung an das fernere Ziel einer Besinnung des Menschen über sich selbst begriffen sind. Man muss sagen: Dilthey ist absolut kein Philosoph der modernen Technik. Im Gegenteil, er sieht im Techniker des Alltags ausdrücklich den Mann des engen Spezialwissens. Hingegen macht Schmidt das Technisieren – die moderne Technik wird repräsentiert durch Automaten – zum Hauptmerkmal der Spezies Mensch.

Die Schriften von Schmidt enthalten durchaus Hinweise auf die Klassiker: Kant, Herder, Schleiermacher, Hegel. Was Schmidt und andere Kybernetiker der 1950er und 1960er Jahre aber versäumen – so die Behauptung hier – ist, sich ausführlich einzulassen auf die philosophischen Klassiker, die doch die teleologische Kausalität bereits erörtert haben und damit Vordenker der Kybernetik sind. Peter Krausser, ein wenig beachteter Kybernetiker der 1960er Jahre, hat sich ausführlich mit Dilthey beschäftigt und sieht in ihm einen solchen Vordenker (Krausser 1963). Krausser wird in den Schmidt-Papieren nirgendwo erwähnt, nach meinem Wissensstand auch nicht in den Notizmappen.

Hermann Schmidt, auch wenn er dem Konzept der Universalwissenschaft „Kybernetik" nicht ausdrücklich widersprochen hat, bleibt mit seinem eigentlichen Anliegen ein Philosoph der Technik. Er will der „Gattung Mensch" dienen durch Auftun einer – vorher nicht beachteten – inneren Verbindung zwischen dem Menschen und seiner Technik. Der Philosoph Simon Moser macht am Rande einer kritischen Rezension der Schmidt-Schriften

die Feststellung: „Der ideale ‚Philosoph der Technik' müßte ein produktiver Philosoph und ein tätiger Ingenieur sein." (Moser 1958.)

Im Mittelpunkt der Lehre von Schmidt liegt die technisch-organische Analogie: Moderne Technik arbeitet kreisrelational, also mit Wirkungen, die auf ihre Ursache zurückwirken. Sie ist damit strukturgleich mit allem Organischen, von den Mikroorganismen angefangen bis hinauf zum Menschen, dem Funktionieren von Körper und Geist des Menschen.

Hermann Schmidt hat – neben seiner Haupttätigkeit, Regelungstechnik-Vorlesungen an der TU Berlin zu halten – Jahrzehnte darauf verwendet, seine Lehre von Mensch und Technik zu entwickeln. Diese geschlossen in Form eines (wenigstens kleinen) Buches darzustellen, ist ihm leider nicht gelungen. Er hat eine riesenhafte Menge handschriftlicher Notizen hinterlassen und diese in ca. 200 Mappen abgelegt. Diese befinden sich heute im Archiv der TU Berlin. Die Schmidt'schen Aufzeichnungen zeigen den rastlosen Denker, den nach immerwährender Erweiterung seiner Ideen Suchenden. Schmidt liebte den mündlichen Austausch mit Studenten und jungen Mitarbeitern. Schmidt war der Meinung, dass wichtige Wissenschaft sich einfach darstellen lässt, im Prinzip von der „Gemüsefrau" verstanden werden kann. Leben und Werk von Schmidt sind von einigen Autoren dargestellt worden (Gehlen 1957, Henn 1969, Dittmann 1999, Dittmann 1999-2000, Bissell 2011, Reinschke 2014). Dr. Gabi Schmidt-Adam, die Schwester des Autors, schrieb über ihren Vater: „Er war so besessen von der Idee des Regelkreises, daß er nur sich selbst als Urheber gesehen hat, sich nur so sehen konnte. Andere Denker waren für ihn wohl eher Konkurrenten, nicht Mitstreiter …" (private Mitteilung).

In den Publikationen von Hermann Schmidt erscheint Wilhelm Dilthey nirgendwo namentlich. Es zeigt sich aber, dass die (Lebens-) Philosophie von Wilhelm Dilthey – zusammen mit deren Begriff der Objektivation – das philosophische Weltbild des jungen Schmidt geformt hat und die sich – Jahrzehnte später – in seiner Gedankenführung zu „Mensch und Technik" bemerkbar macht. Plausibel erscheint diese Schlussfolgerung dadurch, dass Schmidt als Göttinger Student um 1923 Philosophie bei Georg Misch belegt hat, einem Dilthey-Schüler und Herausgeber einiger Bände von Diltheys Gesammelten Schriften (vgl. Dilthey 1924, 1927, 1934). Im Schmidt'schen Nachlass gibt es (vom November1923) das Anmeldeblatt des Studenten Hermann Schmidt zur Dr.-Prüfung. Danach ist er, im Nebenfach Philosophie von Prof. Misch geprüft worden. Im Nachlass befinden sich allerdings keine Vorlesungsnotizen des Studenten Schmidt, wohl aber gibt es aus den 1960er Jahren, (in einer Mappe der Rubrik SAM) ein handschriftliches, langes Dilthey-Zitat mit der abschließenden Notiz „trifft alles auch auf die Technik zu". Der frühere Schmidt-Mitarbeiter Hans-Jürgen Winter hat eine Liste der damaligen Gesprächsthemen zusammengestellt. Unter diesen kommt „Dilthey" allerdings namentlich vor (Schmidt-Nachlass, Ordner „Winter").

Für Dilthey geschieht Objektivation in der Abfolge dreier geistiger Schritte, nämlich „Erlebnis, Ausdruck, Verstehen". Was das Subjekt (im ersten Schritt) mit Hilfe von Sehen, Hören und Fühlen erlebt, wird über das Medium der Sprache und der Schrift (im zweiten Schritt) ausgedrückt, d.h. in die Außenwelt transportiert und (im dritten Schritt) vom Subjekt als Äußeres wahrgenommen und auf diesem Wege neu und tiefer verstanden. Dilthey spricht von der „Objektivation des Lebens" (Dilthey 1927): „Erfassen wir die Summe aller Leistungen des Verstehens, so tut sich in ihm gegenüber der Subjektivität des Erlebnisses die Objektivierung des Lebens auf. […] Das Individuum, die Gemeinschaften und die Werke, in welche Leben und Geist sich hineinverlegt haben, bilden das äußere Reich des Geistes. Diese Manifestationen des Lebens, wie sie in der Außenwelt dem Verständnis sich darstellen, sind gleichsam eingebettet in den Zusammenhang der Natur. Immer umgibt uns diese große äußere Wirklichkeit des Geistes. Sie ist eine Realisierung des Geistes in der Sinnenwelt vom

flüchtigen Ausdruck bis zur jahrhundertelangen Herrschaft einer Verfassung oder eines Rechtsbuchs. […] Und hier vollendet sich nun der Begriff der Geisteswissenschaften. Ihr Umfang reicht so weit wie das Verstehen, und das Verstehen hat nun seinen einheitlichen Gegenstand in der Objektivation des Lebens. So ist der Begriff der Geisteswissenschaft nach dem Umfang der Erscheinungen, der unter sie fällt, bestimmt durch die Objektivation des Lebens in der äußeren Welt. Nur was der Geist geschaffen hat, versteht er. Die Natur, der Gegenstand der Naturwissenschaft, umfaßt die unabhängig vom Wirken des Geistes hervorgebrachte Wirklichkeit. Alles, dem der Mensch wirkend sein Gepräge aufgedrückt hat, bildet den Gegenstand der Geisteswissenschaften."

In seiner Antrittsvorlesung in Basel im Jahr 1887 analysiert Dilthey Goethe und führt aus (Dilthey 2024, 23): „Hier ist also die Konzeption, vermöge deren die Natur verstanden werden kann. Es wird sich darum handeln, der Natur ihre Technik abzulauschen; denn in einer solchen muß das Wesen enthüllt werden, welches denkt, aber nicht als ein Mensch." Dilthey verwendet hier das Wort „Technik". Er meint damit den Vorrat an Werkzeugen und Verfahrensweisen, welche die Natur verwendet, um ihre Kreaturen aufzubauen und zu erhalten.

An anderer Stelle führt Dilthey aus: „Ebenso enthält dieser teleologische Zusammenhang die Wurzeln aller zweckmäßigen Effekte in Menschenleben, Gesellschaft und Geschichte. Man kann also auch von einem […] Typus des Seelenlebens reden, der von der niedersten Stufe des tierischen Daseins aufwärts bis zu dem Menschen reicht." (Dilthey 1934, 188.)

Otto Friedrich Bollnow fasste die Lehre Dilthey's vom geistigen Menschen prägnant zusammen: „Darum geht für Dilthey der Weg eines gesicherten Verstehens über die Objektivationen des Lebens, über die Gebilde, die es aus sich hervorgebracht hat und in denen es in einem indirekten Verfahren sich selbst erkennt […] Erlebnis, Ausdruck und Verstehen […]. Nur in diesem Verfahren, dem Kernstück seiner Lehre überhaupt, erfassen wir den vollen Dilthey […]." (Bollnow 1958.) Hier erscheint der Begriff der Objektivation des Lebens, die den Menschen dazu führt, sich selbst zu erkennen. Wenn man anstelle der allgemeinen Geistestätigkeit des Menschen sein Technisieren setzt, wie nah ist man damit der Lehre von Schmidt zu Mensch und Technik!

Die nachfolgenden Auszüge aus Papieren von Hermann Schmidt geben eine Orientierung, was er mit der Wandlung des Menschen durch die Technik meint (Schmidt 1965, 1967). Die grundlegende Rolle hat dabei die Kreiskausalität.

Hermann Schmidt hat seine Sicht auf die Regelungstechnik – sie sei die methodische Vollendung der Technik – erstmals 1941 in der Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI-Zeitschrift) beschrieben. Im letzten Abschnitt heißt es dort unter der Überschrift „Die kulturpolitische Auswirkung der Regelungstechnik": „Dieses Nachdenken lehrt ihn, den Techniker, daß seine technische Welt keine Wand ist, die ihn von der Natur trennt, sondern eine Brücke, auf der sich Natur und Geist begegnen, eine Welt, in der sich durch die Arbeit unserer Hände Natur und Geist verbunden haben, eine Welt wie die der Sprache, die wir aus eigener Schöpferkraft zwischen uns und die Natur gesetzt haben und die uns deshalb viel näher steht als die unberührte Natur. […] Angesichts der Vollendung der technischen Welt werden wir zu einer Wissenschaft geführt, in der die Kategorien der Naturwissenschaften, zu denen vor allem die Begriffe der Größe und der Kausalität gehören, sich mit denen der Geisteswissenschaften, unter ihnen vor allem die Begriffe der Gestalt und der Finalität unter einer höheren Einheit zusammenfinden." (Schmidt 1941.)

1964 antwortete Hermann Schmidt auf die Frage „Wie beurteilen Sie die künftige Entwicklung der Kybernetik" leicht zweifelnd: „In der Notwendigkeit des Wandels dieser Selbstauffassung des Menschen liegt die Schwierigkeit für eine gesunde Weiterbildung der Arbeit, die durch die Kybernetik eingeleitet wurde. […] Es genügt nicht, nur über die

kybernetischen Systeme und ihre Anwendungsmöglichkeiten nachzudenken: Wir dürfen die Frage der Kybernetik nicht von der nach dem Menschen lösen." (Schmidt 1964.)

Die Lehre von Hermann Schmidt von Mensch und Technik erwächst aus der die ganze Technik übergreifenden Regelungstechnik und geht von dort weiter zur technisch-organischen Analogie. Dieselben Schritte vollzieht auch die Kybernetik Norbert Wieners. Für Schmidt liegen aber die Begriffe Rückkopplung und Kreiskausalität ganz im Mittelpunkt: „Kreiskausalität heißt, daß eine physische Ursache nicht nur der linearen Kausalität gemäß eine Wirkung hat, sondern daß diese Wirkung auf die Ursache zurückwirkt." (Schmidt 1964.)

Die kreiskausale Wirkungsweise ist – unter dem Namen „teleologische Kausalität" ganz ohne Bezug auf den Regelkreis des Technikers – in anderen Zusammenhängen beschrieben worden, so von den Klassikern Herder, Kant, Schleiermacher, Hegel und Dilthey, worauf Schmidt in seinen Papieren (mit Ausnahme von Dilthey) auch hinweist. Manko bei Schmidt bleibt die knappe Anknüpfung an die Klassiker. Man darf indessen sagen: Schmidt hat die Klassiker des deutschen Idealismus geliebt. In seinem letzten Papier erscheinen längere Hegel-Zitate (Schmidt 1967).

Wenn Schmidt auf konkurrierende zeitgenössische Philosophen wie Karl Jaspers, Friedrich Dessauer, Gotthard Günther und Georg Klaus nur wenig eingeht, mag man das aus der inhaltlichen Distanz zur eigenen Lehre verstehen. Freundschaftlich verbunden war Hermann Schmidt mit dem eine Generation jüngeren Kybernetiker Helmar Frank. Ohne Frank wäre Schmidt's Lehre von Mensch und Technik wohl bloß als gelegentlicher philosophischer Versuch eines Ingenieurs beiseite getan worden (Frank 1966). Schmidt hat in gutem Einvernehmen mit seinem Philosophie-Kollegen Johannes Erich Heyde von der TU Berlin gestanden, ebenso mit den Philosophen Gerhard Lehmann und Theodor Litt. Kritik von außen hat Schmidt gern mit dem Argument, Kritiker hätten ihn nicht verstanden abgewehrt. Er sagte gerne: „Eine Sache, die gut ist, wird sich auf lange Sicht durchsetzen."

Hermann Schmidt erläutert den Kern seiner Technikauffassung so: „Wenn wir den technischen Regelkreis als Objektivation des organischen Lebens verstehen, so meinen wir damit nicht, der technische Regelkreis liege auf dem Wege zur technischen Herstellung des organischen Lebens, insbesondere des Menschen; Leben sei Mechanismus. Im Gegenteil: Die technische Objektivation des Lebens ist seine Entseelung, seine Entsubjektivierung, ist die Erzeugung eines unlebendigen Schattenrisses des Lebens, der jedoch mit ihm formgleich ist. […] An die Stelle des psychophysischen Wirkungszusammenhangs setzt die technische Objektivation die Kreiskausalität" (Schmidt 1967).

Da die Philosophie von Schmidt um den Begriff der teleologischen Kausalität zentriert ist, hätte er in den frühen 1960er Jahren guten Grund gehabt, auf Georg Klaus zu achten, der diese besondere Art von Kausalität einerseits gegen die (vorwärts gerichtete, aber blinde) lineare Kausalität, andererseits gegen die (das Ziel sehende, aber physikalisch nicht erklärbare, übernatürliche) finale Kausalität abgrenzt (Klaus 1960). Klaus sagt: „Große Philosophen, […] haben, wenn auch mit unterschiedlichen Gründen, die Unvermeidlichkeit teleologischer Erklärungsweisen vertreten" (Klaus 1961).

Norbert Wiener und Mitarbeiter haben früh die Bedeutung des „Feedback", also der Rückkopplung, für die moderne Technik beschrieben (Rosenblueth/Wiener/Bigelow 1943).

Man kann wohl sagen, dass Hermann Schmidt sich selbst dabei im Wege stand, seine Philosophie den Zeitgenossen nahezubringen. Er hätte (a) den Klassikern mehr Raum geben sowie (b) die Philosophen seiner Zeit einbeziehen können, um sich ggf. von diesen abzugrenzen. Ein Teil der Antwort zu (b) ist: Schmidt hat die Schulphilosophen gefürchtet, da er annahm, sie würden seine Lehre durch „ihre Mühlen drehen" (vgl. Moser's Einwände in Moser 1958).

Sucht man nach den Gründen, warum Hermann Schmidt in seinen gedruckten Papieren keinen Hinweis auf Dilthey gibt, so sind es wohl vor allem diese zwei:

- Zwischen Schmidt's Studentenzeit, als er Hörer bei Misch war, und den 1950er Jahren, als er seine Technikphilosophie formulierte, haben etwa 30 Jahre gelegen. Zudem gab es verschiedene berufliche Anforderungen anderer Art.
- Dilthey's Interesse galt den Geisteswissenschaften, ganz und gar nicht der Ingenieurtechnik oder gar der Ingenieurkunst. Im Gegenteil, der „Techniker" ist für Dilthey der Wissens-Spezialist, der über sein Fachgebiet nicht hinausschaut. Wer wie Schmidt der Technik neue Wertschätzung geben wollte, hatte keine Veranlassung, gerade Dilthey heranzuziehen.

Die Schmidt'sche Anthropologie sagt im Grunde: Der Mensch technisiert seit Jahrtausenden, und die modernen Automaten führen die Technik zu ihrer methodischen Vollendung. Für Schmidt ist Technik ein – vielleicht zentrales – Kulturgut. Die Technik – hierin ist Schmidt ganz im Einklang mit seinen Zeitgenossen Arnold Gehlen, Ortega y Gasset, Theodor Litt – soll von der geringschätzigen Einschätzung befreit werden, zum eigentlichen Menschsein nichts beizutragen,

Nach Schmidt hat der Mensch Grund, gerade im Zeitalter der Automation an die Technik neu zu glauben. Er muss sie dafür in der Tiefe verstehen. Es ist die technisch-organische Analogie, die den technisierenden Menschen auf die innere Verwandtschaft seiner Technik mit der ganzen organischen Natur hinweist.

Man könnte noch folgende Frage stellen: Haben es die Protagonisten der Kybernetik – andere mehr noch als Hermann Schmidt – vielleicht versäumt, die neue Lehre gründlich mit den Klassikern der Philosophie zu verbinden? Die Kybernetik wäre im Fall eines solchen Bezugs allerdings als Fortsetzung und Bestätigung alter Ideen aufgetreten und damit weniger das Glanzvoll-Neue gewesen. Andererseits hätte diese Verbindung der gesamten Kybernetik ein anderes Gesicht gegeben. Möglicherweise wären damit „gelernte" Philosophen zur Mitarbeit motiviert worden (vgl. auch Moser 1958). Die von Schmidt verwendeten Zitate der klassischen Philosophen zeigen, dass erste kleinen Schritt in diese Richtung getan wurden (Schmidt 1967).

Acknowledgement: Der Autor dankt Prof. Dr. Klaus Fuchs-Kittowski (Berlin) für sein Interesse an dieser Ausarbeitung.

Bibliographie

Bissell, Christopher Charles (2011): „Hermann Schmidt and German 'Proto-Cybernetics'". *Information, Communication & Society* 14, 156–171.

Bollnow, Otto Friedrich (1958): „Die Lebensphilosophie". *Verständliche Wissenschaft*, Siebzigster Band. Hrsg. Hans Frh. v. Campenhausen, Berlin, Göttingen & Heidelberg: Springer-Verlag.

Dilthey, Wilhelm (1924): „Die geistige Welt. Einleitung in die Philosophie des Lebens". *Gesammelte Schriften*, Band V und VI, Hrsg. Georg Misch, Leipzig, Berlin: Vandenhoeck & Ruprecht.

Dilthey, Wilhelm (1927): „Die geistige Welt. Einleitung in die Philosophie des Lebens". *Gesammelte Schriften,* Band VII, Hrsg. Georg Misch. Leipzig, Berlin: Vandenhoeck & Ruprecht.

Dilthey, Wilhelm (1934): „Die geistige Welt. Einleitung in die Philosophie des Lebens“. *Gesammelte Schriften*, Band IX, Hrsg. Georg Misch, Leipzig, Berlin: Vandenhoeck & Ruprecht.

Dilthey, Wilhelm (1961): *Die Philosophie des Lebens – eine Auswahl aus seinem Leben*. Stuttgart: B. G. Teubner Verlagsgesellschaft.

Dittmann; Frank (1999): „Zum philosophischen Denken von Hermann Schmidt“. *GrKG/Humankybernetik* 40, 117–128.

Dittmann, Frank (1999-2000): “Aspects oft he Early History of Cybernetic in Germany”. *Transactions of the Newcomen Society* 71, 143–154.

Fasol, Karl-Heinz (2001): „Hermann Schmidt, Naturwissenschaftler und Philosoph, Pionier der allg. Regelkreislehre in Deutschland“. *Automatisierungstechnik* 49, 131–144.

Frank, Helmar G. (1966): *Kybernetik und Philosophie – Materialien und Grundriss zu einer Philosophie der Kybernetik*. Berlin: Duncker & Humblot.

Gehlen, Arnold (1957): *Die Seele im technischen Zeitalter. Sozialpsychologische Probleme in der industriellen Gesellschaft*. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt Taschenbuchverlag.

Henn, Volker (1969): „Materialien zur Vorgeschichte der Kybernetik“. *Studium Generale*, Band 22, 164–190.

Klaus, Georg (1960): „Das Verhältnis von Kausalität und Teleologie in kybernetischer Sicht“. *Deutsche Zeitschrift für Philosophie* 8, 1266–1277.

Klaus, Georg (1961): *Kybernetik in philosophischer Sicht*. Berlin: Dietz-Verlag.

Krausser, Peter (1963): „Diltheys’ philosophische Anthropologie“. *Journal of the History of Philosophy* 1, 211–221.

Moser, Simon (1958): *Metaphysik einst und jetzt*. Berlin: De Gruyter.

Reinschke, Kurt (2014): *Lineare Regelungs- und Steuerungstheorie*. 2. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

Rosenblueth, Arturo / Wiener, Norbert / Bigelow, Julian (1943): „Behavior, Purpose and Teleology“. *Philosophy of Science* 10, 18–24.

Schmidt, Hermann (1941): „Die Regelungstechnik als technisches und biologisches Grundproblem“. *VDI-Zeitschrift* 85, 81–88.

Schmidt, Hermann (1964): „Beginn und Aufstieg der Kybernetik“. *VDI-Zeitschrift* 106, 753.

Schmidt, Hermann (1965): „Die anthropologische Bedeutung der Kybernetik, Reproduktion dreier Texte aus den Jahren 1941, 1953 und 1954“. *Grundlagenstudien aus Kybernetik und Geisteswissenschaft*, Band 6, Quickborn bei Hamburg: Verlag Schnelle.

Schmidt, Hermann (1967): „Kybernetik als anthropologisches Problem“. *Pädagogische Arbeitsblätter*, Band 19, 121–136.

E_Mail-Adresse des Verfassers: hmichaelschmidt@web.de

Leibniz Online, Nr. 56 (2025)
Zeitschrift der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin e. V.
ISSN 1863-3285 • DOI: 10.53201/LEIBNIZONLINE56

Norbert Wiener und die heutige Gesellschaft für Kybernetik

Siegfried Piotrowski
(GfK, Berlin)

Veröffentlicht: 20. Juni 2025

Sehr verehrte Frau Präsidentin, verehrte Damen, sehr geehrte Herren und, natürlich, liebe Freunde der Kybernetik,

gestatten Sie mir, heute ein wenig darauf zurückzublicken, wie sich die Kybernetik in unserem Land und bei der Gesellschaft für Kybernetik entwickelt hat. Lassen Sie mich bei Hermann Schmidt beginnen. Sein Sohn Michael hat anlässlich unseres Kolloquiums seinen Vortrag gehalten und uns einige Einblicke in das Leben und die Forschung seines Vaters gegeben.

1941, also vor mehr als 80 Jahren, hat Schmidt in einer Denkschrift zur Gründung eines Instituts für Regelungstechnik an der damaligen Technischen Hochschule zu Berlin-Charlottenburg auf die weit über die technischen Anwendungen hinausgehende Bedeutung des Regelungsbegriffs hingewiesen, in dem er eine neue Denkweise im biologischen und auch gesellschaftlichen Kontext forderte (Schmidt 1941). Abbildung 1 zeigt das Deckblatt dieser Denkschrift.

Denkschrift
zur Gründung eines
Institutes für Regelungstechnik
Dem Vorsitzenden des
Vereines deutscher Ingenieure im NSBDT.
vorgelegt von
DR. PHIL. HERMANN SCHMIDT
a. p. Prof. a. d. Technischen Hochschule Berlin
Reg.-Rat und Mitglied des Reichspatentamts
Obmann des VDI-Fachausschusses für Regelungstechnik
*

Abb. 1: Deckblatt der Denkschrift zur Gründung eines Institutes für Regelungstechnik an der Technischen Hochschule Berlin-Charlottenburg.

Norbert Wiener prägte dann 1948 in seinem Buch "Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine" die Ergebnisse seiner Forschungen über die mathematische Beschreibbarkeit des Verhaltens biologischer und technischer Systeme den kybernetischen Begriff, wie wir ihn heute kennen (Wiener 1948).

Gestatten Sie mir, auf einige wesentliche Aspekte aus einem Artikel vom 5. April 2024 des Max-Planck-Institutes für biologische Kybernetik hinzuweisen. Kybernetik bedeutet, so spekulierte Wiener über Maschinen der Zukunft, dass sich Maschinen über elektronische Schaltkreise selbst replizieren und an neue Erfahrungen anpassen, ähnlich wie lebende Organismen. Er sah also schon Gefahren in dem, was wir heute mit KI – also Künstliche Intelligenz – bezeichnen und prophezeite, dass diese Form der Automatisierung viele Arbeitsplätze kosten und Spannungen erzeugen würde und warnte zugleich, dass

intelligente Maschinen Entscheidungen treffen könnten, die für die Menschen nicht immer wünschenswert sein könnten.

Wiener wurde am 26. November 1894 in Wien geboren. Er galt als Wunderkind. Mit elf Jahren schloss er die Highschool ab und erwarb mit 14 Jahren einen Bachelor in Mathematik. Mit 18 Jahren promovierte er an der Harvard University in mathematische Logik. 1919 ging er ans Massachusetts Institut of Technology. Er entwickelte erste Modelle zur Quantifizierung der Brownschen Bewegung – den unregelmäßigen Positionsänderungen von Teilchen in Flüssigkeiten. Mit Ausbruch des zweiten Weltkriegs wandte sich Wiener dem Problem zu, wie man die Trefferquote von Flugabwehrkanonen auf feindliche Bomber erhöhen könnte. Er entwickelte eine Methode um auf Basis der vergangenen Position eines Flugzeugs vorherzusagen, wohin es flog.

Seine bahnbrechende Erkenntnis war, dass viele komplexe Systeme auf informationsbasierten Rückkoppelungsprozessen beruhen. Ein System wird, wie wir wissen, „intelligent", wenn es sich Erfahrungen aus der Vergangenheit merken und darüber die eigene Performance verbessern kann (Max-Planck-Institut für Biologische Kybernetik 2024).

1959 begann Horst Völz, der uns lange Jahre als Vorsitzender begleitete, seine Arbeit über Informations- und Kommunikationswissenschaft an der Akademie der Wissenschaften der DDR. Diese Arbeiten wurden später in drei Monographien zusammengefasst (Piotrowski 2000b).

Ende 1959 gründeten Max Banse, Gerhard Eichhorn und Helmar Frank in Stuttgart mit die „Grundlagenstudien aus Kybernetik und Geisteswissenschaften", die erste deutschsprachige Zeitschrift für Kybernetik (Piotrowski 2000b).

1960 begann Kurt Alsleben, eines der späteren Gründungsmitglieder der Gesellschaft für Pädagogik und Information, seine Arbeit über Informations- und Diskettentypographie (Piotrowski 2000b). Ein Jahr später nahm Václav Kulic seine Arbeit über Psychologische Lerntheorie, Programmierten Unterricht, Psychologie des geregelten Lernens, Bildungstechnologie und kybernetische Pädagogik auf (Piotrowski 2000b).

1963 fand das erste Nürnberger Symposion über Lehrmaschinen (Erste europäische Fachtagung über Programmierte Instruktion) statt. Im gleichen Jahr wurde Helmar Frank zum außerordentlichen Professor auf den Lehrstuhl für Informationswissenschaft der Pädagogischen Hochschule Berlin berufen (Piotrowski 2000b).

1964 ernannte der Berliner Senator für Wissenschaft und Kunst die Forschungs- und Entwicklungsstelle des Lehrstuhls für Informationswissenschaft zum Institut für Kybernetik, in dem mit Unterstützung der Deutschen Forschungsgemeinschaft und der Stiftung Volkswagenwerk erste Lehrautomatenentwicklungen angelaufen waren (Piotrowski 2000b). Außerdem begann Heinz Lohse, auch einige Jahre Vorsitzender unserer Gesellschaft, seine Arbeit über Programmierten Unterricht, Lernpsychologie und empirische Unterrichtsforschung (Piotrowski 2000b).

1965 wurde die „Vereinigung zur Förderung der Kybernetik in Forschung und Lehre" gegründet. Zu den Mitgliedern gehörten Siemens AG, AEG/Telefunken, Qickborner Team und andere (Piotrowski 2000b).

1967 erhielt das Institut für Kybernetik der Pädagogischen Hochschule Berlin im Beisein von Werner Stein, Hermann Schmidt und anderen von der Siemens AG ein Rechenzentrum (Piotrowski 2000b). 1968 wurde das am Institut mit Förderung der Nixdorf AG entwickelte rechnerunterstützte Parallelschulungssystem ROBBIMAT III sowie ein Anschluss an das Rechenzentrum des Instituts zur Fernbenutzung der Formaldidaktiken ("Telealzudi") in der Berliner E. O. Plauen-Schule öffentlich eingeweiht. Der Grundstein für den rechnerunterstützten Unterricht (RUU) und den Einsatz der Formaldidaktiken in der deutschen Schulpraxis war damit gelegt. Noch im gleichen Jahr stellte das Institut im

Deutschen Museum in München das Prinzip der Formaldidaktiken durch Datenfernübertragung mit seinem Rechenzentrum vor.

Während der 23. Internationalen Hochschulwochen in Alpbach (Tirol) war 1967 die Arbeit des Institutes für Kybernetik der Pädagogischen Hochschule Berlin vorgestellt worden. Dabei kam die Idee für die Gründung einer Bildungswissenschaftlichen Universität in Klagenfurt auf. Die Bildung dieser Universität wurde dann 1970 vom österreichischen Nationalrat beschlossen (Piotrowski 2000b).

1970 kam es auch zur Gründung der gemeinnützigen Forschungs- und Entwicklungsgesellschaft mbH „Institut für Kybernetik" mit Sitz in Berlin. Mit dem 17. August 1970, dem Gründungsdatum, ist damit die heutige Gesellschaft für Kybernetik offiziell aktiv (Piotrowski 2000b).

Für unsere Gesellschaft habe ich 1999/2000 einen umfassenden Kybernetik-Begriff formuliert. Danach wird der Begriff Kybernetik in Übereinstimmung mit Hermann Schmidt (1941) und Norbert Wiener (1948) nicht auf die Theorie und Technik der Regelung beschränkt verstanden, sondern als Beschäftigung mit der Übertragung und Verarbeitung von Informationen unter Verwendung analytischer, modellierender, messender und kalkülisierender Methoden zum Zwecke von Prognosen (A. Comte) und Objektivationen (H. Schmidt) (Piotrowski 2000a).

Dabei kann Verarbeitung und raumzeitliche Übertragung von Informationen (A) in und zwischen Subjekten (Anthropokybernetik) oder (B) auf der biologischen Ebene (Biokybernetik) oder auch (C) in Maschinen (Konstruktkybernetik) erfolgen, aber auch (D) als vom Seinsbereich unabhängige Struktur betrachtet werden (allgemeine Kybernetik). In all diesen vier Bereichen führt die Analyse auf vier aufeinander aufbauende Gegenstandsstrukturen:

(A) Messung, Codierung und Übertragung von Information
(B) Algorithmen und Systeme der Informationsverarbeitung
(C) zielgerichtete Umweltlenkung (speziell: Regelung)
(D) Zielverfolgung im Einflussbereich andere Subjekte (speziell: mathematische Spieltheorie)

Dieser umfassende Kybernetikbegriff schließt für die heutige Gesellschaft für Kybernetik u. a. die folgenden Disziplinen ein:

- Mathematische Informationstheorie
- Informatik
- Regelungstheorie
- allgemeine Systemtheorie
- Wirtschaftskybernetik (mathematische Wirtschaftsforschung)
- Spieltheorie
- Organisationskybernetik
- Theorie künstlicher Intelligenz
- Bildungstechnologie

Das findet sich auch im Statut zur Vergabe des Wiener-Schmidt-Preises wieder, das am 13. November 2004 beschlossen wurde (GPI 2004).

Ich darf an dieser Stelle auch einige Wissenschaftler, die unserer Gesellschaft zum Teil eng verbunden waren, ausdrücklich anführen, weil sie als deutsche Kybernetiker zur gesellschaftlichen Verankerung der Kybernetik mittels Publizistik, Institutionalisierung oder akademischer Lehre beigetragen haben:

- Felix von Cube
- Helmar Frank
- Wolfgang Giloi
- Günther Gotthard
- Georg Klaus
- Friedhart Klix
- Manfred Krause
- Milos Lánký
- Uwe Lehnert
- Manfred Peschel
- Karl Wilhelm Steinbuch
- Ulrich Steinmüller

Diese Aufzählung ist natürlich unvollständig, ebenso die wenigen Daten und die anderen Personen, die ich in meinem Beitrag hier vorstelle.

Ich danke Ihnen herzlich für die mir geschenkte Aufmerksamkeit. Und freue mich sehr darauf, gleich Frau Sommerfeld und Herrn Krause ehren zu dürfen.

Bibliographie

GPI - Gesellschaft für Pädagogik, Information und Medien e.V. (2004): Statut zur Vergabe des Wiener-Schmidt-Preises durch die GfK und die GPI. www.gpi-online.eu/ueber-die-gpi/auszeichnungen-und-ehrungen/ueber-die-gpi-statut.

Max-Planck-Institut für Biologische Kybernetik (2024): Von der Kybernetik zur KI: die bahnbrechende Arbeit von Norbert Wiener. www.kyb.tuebingen.mpg.de.

Piotrowski, Siegfried (2000a): „Bestimmungsversuche zur Kybernetik. Berliner November 1999“. *Das virtuelle Kybernetik-Magazin*, Ausgabe 1. ssn 1439–8850.

Piotrowski, Siegfried (2000b): „Die (Deutsche) Gesellschaft für Kybernetik. Kybernetiknet“. *Das virtuelle Kybernetik-Magazin*, Ausgabe 3. ssn 1439–8850.

Schmidt, Hermann (1941): *Denkschrift zur Gründung eines Instituts für Regelungstechnik*. Berlin: VDI-Verlag. (Nachgedruckt in: GrKG 2, Beiheft, Quickborn bei Hamburg: Verlag Schnelle, 1961).

Wiener, Norbert (1948): *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Paris: Hermann & Cie Editeurs,. (2nd revised ed. 1961).

E-Mail-Adresse des Verfassers: piotrowski@zedat.fu-berlin.de

Leibniz Online, Nr. 56 (2025)
Zeitschrift der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin e. V.
ISSN 1863-3285 • DOI: 10.53201/LEIBNIZONLINE56

Über den Ursprung von Information

Adalbert Feltz
(Trofaiach/Österreich)

Veröffentlicht: 20. Juni 2025

Abstract
Aside from the terms energy and matter, which are important for science and engineering, information appears to be of similar importance. Information seems to depend always on living systems or is bound to a suitable technical equipment formed by human doing. According to the laws of interaction of forces energy and matter form the inanimate nature yielding atoms from elementary particles and the latter molecules. These form liquids and solid states. Such processes tend to minimize free energy in order to achieve thermodynamic equilibrium. However, primeval nature requires external sunlight absorption by chemical compounds of special structures in order to record energy. The latter can be used for providing heat or in part work. Closely related the cells of plants achieved the capability for recording routes for syntheses of such structures and this step appears to be the entrance of information into our world.

Photosynthesis as the fundamental process for development of life has been specified in detail indicating the universal importance of 2 purine bases adenine, guanine and 2 or 3 pyrimidine bases cytosine, uracil or thymine each bound at ribose and together with phosphoric acid forming 4 or 5 different nucleotides valid for all plants and animals (eucaryotes). These nucleotides are bound by one an another forming the long biopolymer chains of a ribonucleic acid RNA. For recording syntheses of proteins each of the nucleotides is part of a triple unit (codon) for recording one of 20 protein forming amino acids (61 codons of 43 = 64). For cover the information is preserved in the double helix of DNA placed in the nucleus where deoxyribose is substituted for ribose and thymine for uracil

It is shown that birefringence and chirality caused by anisotropy should be taken into consideration for propagation of light within the chloroplasts of sheets and presumably have already been important in the earlies states of evolution. Some possible routes are taken into consideration for development of information closely related to molecular structures in evolution.

Resümee

Neben Energie und Materie als wichtige Größen für die Natur- und Ingenieurwissenschaften nimmt die Information einen etwa vergleichbar bedeutsamen Platz ein. Information ist an lebende Systeme oder geeignete technische Anordnungen gebunden, die von Menschen eingerichtet wurden. Energie und stoffliche Materie bilden den Gesetzen der Wechselwirkung von Kräften folgend die unbelebte Natur, indem aus Elementarteilchen Atome entstehen, letztere Moleküle bilden und diese zu Flüssigkeiten und Feststoffen aggregieren. Derartige Prozesse verlaufen unter Minimierung der Freien Energie in Richtung eines Gleichgewichts. Die belebte Natur ist dagegen mittels spezieller Molekül-strukturen entstanden, die in der Lage sind, Sonnenlicht zu absorbieren und diese Energie in Verbindungen zu speichern, sodass man sie zur Freisetzung von Wärme und Gewinnung von Arbeit nutzen kann. Bereits die ersten Lebensformen erwiesen sich in der Lage,

chemische Prozesse zur Synthese derartiger Moleküle als Information zu speichern, und dadurch Replikation zu ermöglichen.

Die Photosynthese als fundamentaler Prozess für die Entstehung von Leben auf unserem Planeten wird komprimiert, aber auch im Detail beschrieben und dabei die für Eukaryoten universelle Bedeutung der 2 Purin-Basen Adenin, Guanin und der 2 bzw. 3 Pyrimidin-Basen Cytosin sowie Uracil bzw. Thymin aufgezeigt, die jede an Ribose und diese an Phosphorsäure gebunden ein Nukleotid bilden. Letztere bilden durch Kondensation aneinander gekoppelte Biopolymere, Ribonukleinsäuren RNS. In der Abfolge von jeweils 3 Nucleotid-Tripeln (61 verschiedene Codons von 43=64) für jeweils eine von 20 Protein bildenden Aminosäuren besteht die Speicherung der großen Zahl arteigener Polypeptide. Im Zellkern ist die Information als DNS–Doppelhelix geschützt und dabei Ribose durch Desoxyribose und Uracil durch Thymin ersetzt.

Es wird darauf eingegangen, dass die in Chloroplasten von Blättern grüner Pflanzen erkennbare Anisotropie infolge Doppelbrechung und Chiralität vermutlich bereits in frühen Stadien der Evolution von Bedeutung war und durch die unterschiedliche Orientierung der Amplituden des eingestrahlten Lichts sich eine für die Existenz vorteilhaftere Konfiguration ergeben konnte, die gespeichert wurde und auf diese Weise ein minimaler Schub zur Weiterentwicklung zustande kam.

Keywords / Schlüsselwörter
Information exchange bound to living systems, development in close relation from primeval nature, photosynthesis, high speed of elementary chemical interactions, anisotropy of light propagation in plants
Informationsaustausch gebunden an lebende Systeme, Entwicklung in enger Beziehung zueinander aus unbelebter Natur, Photosynthese, hohe Geschwindigkeit elementarer chemischer Wechselwirkungen, Anisotropie der Lichtausbreitung in Pflanzen

Für die naturwissenschaftliche Erkenntnis bis hin zur ingenieurwissenschaftlichen Praxis sind die Grundbegriffe Energie und Materie essentiell, und als von etwa gleichrangiger Bedeutung erweist sich die Kommunikation mittels Information. Darunter versteht man das Wissen, das ein Absender durch Übertragung von Materie bzw. von Energie oder Impulsen in Form von Signalen oder eines Codes dem Empfänger übermittelt, wobei an den Kommunizierenden Menschen, aber auch Tiere, die über Sinnesorgane (Rezeptoren, Nerven) verfügen oder künstliche Systeme wie Maschinen oder Computer, die mit geeigneten Sensoren ausgestattet sind, beteiligt sein können (Wikipedia „Information“). Im allgemeinen Sprachgebrauch wird Information auch etwa gleichbedeutend für Auskunft, Hinweis, Anordnung, Verbot oder Kennzeichnung einer bestimmten Identität verwendet. Information kann i. allg. beliebig oft wiederholt werden, d.h. sie ist speicherbar und daher erneut abrufbar. Dabei fällt auf, dass der Begriff stets an lebende Systeme, eine von diesen geschaffene technische Anordnung bzw. Botschaft gebunden ist. Das lässt die Frage entstehen, wann und in welchem Zusammenhang Information in der Entwicklungsgeschichte erstmals zu verzeichnen ist.

Nach dem tieferen Einblick, den uns die Relativitätstheorie in die Struktur der Welt vermittelt, sind Energie und Masse (Stoff) zwei gemäß $E = mc^2$ (c: Vakuumlichtgeschwindigkeit) äquivalente Erscheinungsformen der Materie, die sicher auch außerhalb unseres Bewusstseins Bestand haben. Aus ihr gestaltet sich nach den Gesetzen der Wechselwirkung von Kräften die vielfältig differenzierte Existenz der unbelebten Natur, und es unterliegt wohl keinem Zweifel, dass die breit gefächert diversifizierten Formen des Lebens auf unserem Wasser - Planeten in einem langen Entwicklungsprozess aus der

unbelebten Natur hervorgingen. Dabei ist bemerkenswert, dass im ersteren Fall der Aufbau von Atomen aus Protonen, Neutronen und Elektronen zu Molekülen, deren Verknüpfung oder Aggregation zu Flüssigkeiten, Gläsern und Polymeren bzw. bei periodischer Anordnung zu Kristallen durch den Antrieb der Minimierung von potentieller Energie bzw. Freier Enthalpie in Richtung eines stabilen Gleichgewichts zustande kommt. Die Entstehung der belebten Natur war dagegen durch entgegen gesetzt verlaufende Vorgänge gekennzeichnet. Mittels elektromagnetischer Strahlung der Sonne ging in einem langwierigen Prozess, der die Herausbildung eines photochemisch aktiven Katalysators, des grünen Blattfarbstoffs Chlorophyll, einschloss, aus CO_2 und Wasser unter Freisetzung von Sauerstoff der Aufbau von Kohlehydraten hervor (Assimilation, Photosynthese), die gegenüber den Ausgangsstoffen eine höhere potentielle Energie aufweisen. Sie sind damit ein Energiespeicher und das Ergebnis einer gegen das natürliche Gleichgewicht entgegengesetzt gerichteten Reaktion. Diese Eigenschaft liegt in der Pflanzenzelle gespeichert vor, dient der Replikation von Zellen mit gleichem Aufbau und erweist sich damit als eine beliebig oft abrufbare Information. Die Diversifizierung im Pflanzenreich (1,8 Mio. Arten bekannt, 15 Mio. geschätzt) ist daraus hervorgegangen, und in einem weiteren Schritt nach dem gleichen Konzept der Informationsspeicherung, die in Pflanzen gespeicherte Energie nutzend, die Tierwelt (10 bis 100 Mio. Arten) sowie schließlich der Mensch (Eukaryoten = Tiere, Pflanzen, Pilze mit Zellen, die die Erbinformation im Zellkern aufbewahren). Aber bereits in davor nachweisbaren Formen des Lebens, den Prokaryoten (Bakterien, Archaeen), die über keinen Zellkern verfügen und auch Vorformen der heute dominierenden Photosynthese oder andere Wege des Stoffwechsels nutzen bzw. genutzt haben sowie in Phagen und Viren, die parasitisch leben, liegt die Information zur Reproduktion der eigenen Identität gespeichert vor.

Ein solcher Zusammenhang lässt darauf schließen, dass der Ursprung von Information mit der Entstehung der belebten Natur und daher mit der Photosynthese als der für die Entstehung der Pflanzen- und Tierwelt grundlegenden Reaktion verknüpft ist. Ihre Entstehung lässt sich bis in eine sehr frühe Phase der Erdgeschichte zurückverfolgen (Wikipedia „Chronologie der Erdgeschichte“). Ihr ging vor schätzungsweise 3,5 Ga die anoxygene Photosynthese voraus (Proteobakterien), und gestützt auf Ablagerungen in geologischen Schichten vor etwa 2,3 – 2,4 Ga, die Umstellung auf die oxygene Photosynthese (Olsen 2006, Czaja et al. 2013), die zur O_2-Anreicherung in der Atmosphäre geführt hat. Deren Beitrag zum O_2-Gehalt der Atmosphäre wird auf ca. 99% geschätzt. Unter der derzeitigen solaren Energieeinstrahlung werden pro Jahr etwa 440 Milliarden Tonnen CO_2 von Pflanzen gebunden, davon gelangt etwa die Hälfte durch pflanzliche Atmung wieder in die Atmosphäre, der Rest wird als Biomasse und im Erdboden gebunden.

Photosynthese

Die Photosynthese ist in einer Vielzahl von Arbeiten detailliert untersucht worden. Im Internet unter „Wikipedia“ sind 107 Originalarbeiten zitiert (Wikipedia „Photosynthese“). Es ist die Lichtreaktion, in der Sonnenlicht in chemische Energie umgewandelt und gespeichert wird, von der lichtunabhängigen Dunkelreaktion zu unter-scheiden, die zur CO_2-Bindung und Synthese von Glucose bzw. Stärke führt. Es gilt die Bruttoumsatzgleichung $6\ CO_2 + 6\ H_2O \Rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2 + 2860$ kJ/mol, d.h. unter Standardbedingungen (25°C, 1 at) lassen sich aus 180 g Glucose 2860 kJ Wärmeenergie gewinnen bzw. davon 917,2 kJ als mechanische Arbeit (Muskelarbeit) nutzen.

In lamellenartig aufgebauten Organellen (50 -200 pro Blattzelle), den Chloroplasten (ca. 8 µm ∅, 4 µm dick), finden Chlorophyll-Synthese und die Umwandlung von Lichtenergie in gespeicherte chemische Energie mittels zweier unterscheidbarer Fotosysteme Ph_1 (480

nm, blau) auf der Innenseite der Doppelmembran und Ph_2 (700 nm, rot) auf der Außenseite statt (Abbildung 1) – unterstützt durch einen sog. Lichtsammelkomplex (Light Harvesting Complex, LHC).

Ph_1 spaltet gemäß 2 Chlor + 2 hυ → 2 $Chlor^+$ + 2 e Elektronen vom Chlorophyll ab, die von Akzeptoren A des LHC (Mn,Ni,Cu-Chelatkomplexe) als A^{2-} gebunden werden. Als starkes Oxydationsmittel bilden 2 $Chlor^+$ aus 2 OH^--Ionen des Wassers 2 OH-Radikale, die zu H_2O und ½ O_2 zerfallen. Zugleich werden auf der Innenseite im Ph_2 gemäß 2 Chlor + 2 hυ → 2 $Chlor^+$ + 2e gebildet. Im Potentialgefälle ΔE der Doppelmembran ergibt sich entsprechend ΔG = 2F∗ΔE die Triebkraft von 32,3 kJ/mol zur Bildung von Adenosintriphosphat (ATP) als Energiespeicher aus Adenosindiphosphat (ADP) und Phosphorsäure unter Wasserabspaltung (Abbildung 2).

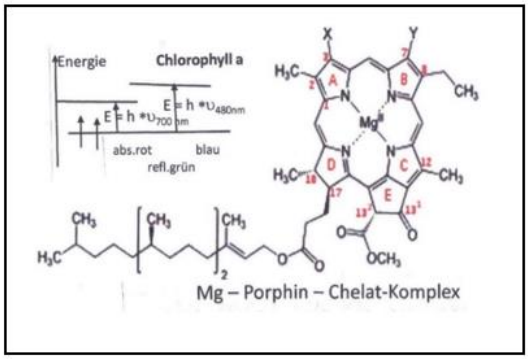


Abb. 1: Chlorophyll a (X: $CH{=}CH_2$, Y: CH_3).

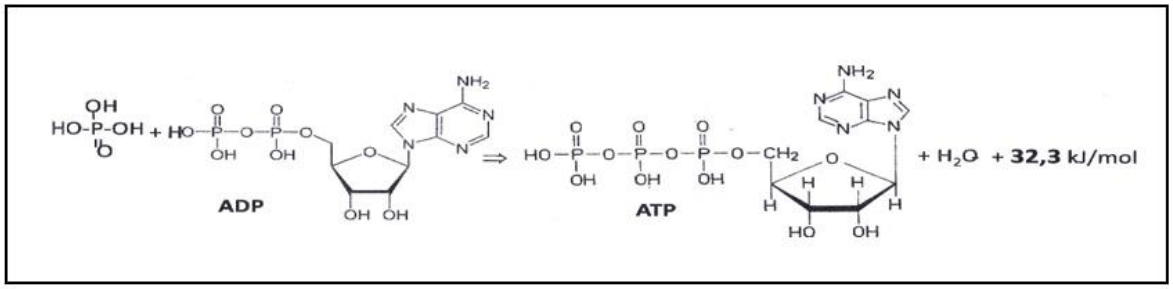


Abb. 2: Gleichung zur Bildung von ATP aus ADP.

Neben der Pyrolyse von Wasser unter O_2-Abspaltung und der Bildung von ATP findet in der Lichtreaktion noch ein weiterer Prozess der Energiespeicherung statt: Im Nikotinsäureamid $NADP^+$, das an Ribose gebunden vorliegt und mit ADP verbunden ist, wird das benzoide Bindungssystem zum chinoiden NADPH reduziert (Abbildung 3).

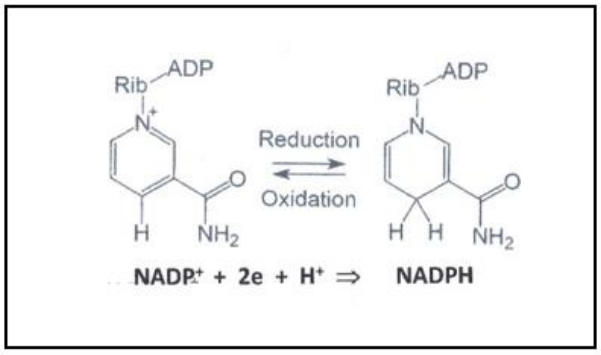


Abb. 3: Reduktion von $NADP^+$-Ribose zu NADPH.

Bei der im Stroma der Chloroplasten ablaufenden lichtunabhängigen Reaktion (Dunkelreaktion) kommt es in einer komplizierten, zyklisch verlaufenden Reaktionsfolge, dem sog. Calvin-Zyklus (Wikipedia „Calvin-Zyklus), der mittels Isotopenmarkierung aufgeklärt werden konnte, zur CO_2-Anlagerung an Ribulose-1,5-biphosphat an dem der Ketogruppe benachbarten C-Atom als Carboxylatgruppe (Ribulose = Keto-Variante der Ribose) zur Bildung einer labilen C_6-Verbindung, die unter Aufnahme von H_2O und Protonierung in zwei Moleküle 3-Phospoglycerat zerfällt. Letztere werden durch NDPH aus der Lichtreaktion zu Glycerinaldehyd-3-phosphat GAP reduziert. Davon scheidet 1/6 durch Zusammenlagerung zweier GAP-Moleküle unter Bildung von Fructose-1,6-Diphosphat aus dem Zyklus aus und wird zu Glucose umgebaut. Der Hauptteil an Glycerinaldehyd-Phosphat GAP (5/6) wird in einer weiteren Folge von Reaktionen unter Abspaltung von Phosphorsäure in 3/6 Ribulose-5-phosphat umgewandelt, und durch Phosphorylierung mit ATP aus der Lichtreaktion entsteht wieder Ribulose-1,5-biphosphat, das im Kreisprozess als CO_2-Akzeptor fungiert.

In einigen Publikationen ist die hohe Effektivität, mit der in den Chloroplasten Photonen in gespeicherte chemische Energie umgewandelt werden, auf Quantenverschränkung zurückgeführt worden (Sarovar et al. 2010, El-Shishtawy et al. 2018, Wikipedia „Quantenverschränkung). Dabei wird aus ununterscheidbaren Anregungszuständen, die durch im Lichtsammelkomplex LHC korrelierte Wirkung von mehreren Photonen zustande kommt, auf quantenverschränkte Zustände geschlossen, was aber auch in Zweifel gezogen wurde. Die Ununterscheidbarkeit geht aus einem gemeinsamen Ursprung hervor und erst deren Aufhebung durch den Beobachter lässt mit dem Erkennen komplementärer Komponenten auf das Vorliegen von Verschränkung schließen. Die objektive Erkennbarkeit ist dadurch eingeschränkt. Aufspaltung eines Photons in zwei verschränkte Photonen kann in nichtlinearen Kristallen erfolgen oder bei nichtlinearer Beanspruchung des Mediums, z. B. erhöhter Intensität, zustande kommen und war vermutlich zumindest in frühen Stadien der Evolution von Bedeutung (Feltz 2019).

Bemerkenswert ist, dass die Anisotropie der Medien, in denen die Wechselwirkung mit Licht stattfindet, in den zahlreichen Publikationen zur Photosynthese keine Erwähnung findet.

Anisotropie als mögliche Ursache für die Herausbildung von Information

Der Ausschnitt in Abbildung 4 aus einem Chloroplasten deutet den lamellenartigen Aufbau von Organellen (4-8 μm) mit den darin eingebetteten flachen Chlorophyll- und LHC-Chelatkomplexen (einige nm dick) in der Zelle eines grünen Blattes an (Wikipedia „Chloroplast).

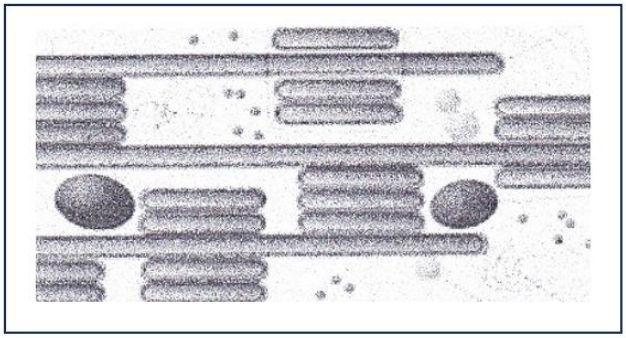


Abb. 4: Ausschnitt aus einem Chloroplasten.

Legt man der Wechselwirkung ein optisch einachsiges Medium zugrunde, wird das einfallende Sonnenlicht in zwei senkrecht zueinander linear polarisierte Strahlen, den ordentlichen und außerordentlichen Strahl, zerlegt, die sich in voneinander abweichenden Richtungen infolge verschiedener Brechzahlen mit unterschiedlicher Wellenlänge ausbreiten und dadurch Molekülschwingungen je nach Orientierung lokal unterschiedlich modulieren können. Letztere unterliegen dem Einfluss aus dem eigenen Umfeld, so z. B. auch dem lokalen pH-Wert bei Vorliegen eines Diffusionsgefälles für H^+-Ionen oder dem Einfluss äußerer Bedingungen, z. B. der Temperatur. Infolge der Schwingungskopplung mit elektronischen Übergängen wäre auch ein Zusammenhang mit der Lichtabsorption ggf. in Betracht zu ziehen. Dabei könnte sich eine für die Lebensfunktion des betreffenden Organs vorteilhaftere Konstellation einstellen, die in den den Chloroplasten eigenen Genen manifestiert wird, sodass auf diese Weise ein Schritt zu größerer Vollkommenheit im Sinne der Evolution zustande kommen kann.

Ein weiterer Hinweis auf den Einfluss von Anisotropie ergibt sich aus der Präsenz asymmetrischer C-Atome im Medium, die dazu führt, dass sich linear polarisierte Wellen als kohärente Überlagerung eines links- und eines rechtsdrehenden Anteils gleicher Intensität mit unterschiedlicher Phasengeschwindigkeit (verschiedene Brechzahlen) im chiralen Medium ausbreiten (nach rechtsdrehend, wenn die Brechzahl für den linksdrehenden Anteil größer ist als der für den rechtsdrehenden). Bemerkenswert ist, dass die gleiche Konformation in der biologisch generierten Doppelhelix anzutreffen ist (Abbildung 5).

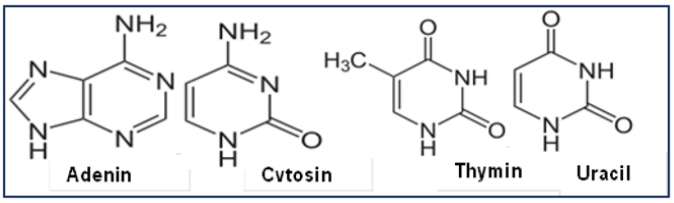
Abb. 5: Struktur der DNS-Doppelhelix.

Aufgrund des stereochemischen Verlaufs chemischer Reaktionen hat sich die Rechtskonformation schon frühzeitig durchgesetzt: Biologisch generierte und zu Polypeptiden verbundene Aminosäuren sowie Glucose und auch Kohlenhydrate gehören dieser Konformation ebenfalls an.

Unserem an makroskopische Dimensionen geschulten Denken erscheint das Zustandekommen von Informationsspeicherung – beim Menschen bis hin zur Ausbildung

des im Gehirn gespeicherten Bewusstseins – auf dem Weg derartig infinitesimaler Schritte kaum nachvollziehbar:

- 46 Chromosomen in 23 Paaren mit im Mittel 140 Mio. Basenpaaren und je >1000 Genen pro Paar Chromosomen, insgesamt ca. 3,2 Mrd. Basenpaare, von denen aber nur 1,2% in etwas weniger als 24 000 Genen für die Proteinsynthese codierend wirken und auf diese Weise 34 300 Proteine, Proteide, Enzyme mit jeweils eigener Stoffwechselfunktion (Bauer 2008, Bauer 2010). Die Hausmaus hat 40 Chromosomen in 20 Paaren mit insgesamt ebenfalls ca. 3 Mrd. Basenpaaren, und ca. 24 000 Genen und selbst der Fadenwurm hat noch 6 Chromosomen mit >100 Mio. Basenpaaren und 2321 Genen.
- Es handelt sich bei Eukaryoten stets um die 4 Basen A, C, G, und U bzw. T (Abbildung 6, ohne Guanin), die wie in Abbildung 7 für Guanin gezeigt, über Ribose und Phosphorsäure zu einem Nukleotid verbunden und letztere über Ribose linear zu Biopolymeren, den Ribonukleinsäuren RNS, verknüpft sind.



A **C** **T** **U**

Abb. 6: Formeln der Nukleotidbasen Adenin, Cytosin, Thymin und Uracil.

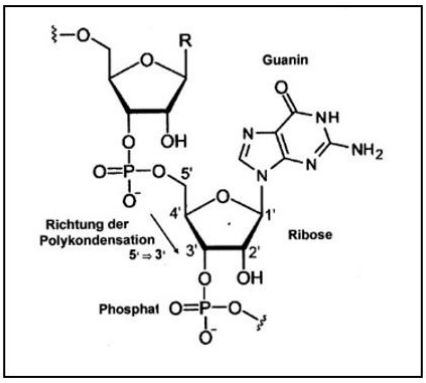


Abb. 7: Guanin, über Ribose und Phosphorsäure zu einem Nukleotid verbunden.

- Jeweils 3 der durch A, C, G, und U bzw. T markierten Nukleotide ergeben 64 = 43 Tripel, sog. Codons, von denen auf dem Polymerstrang 61 für die Codierung je einer von 20 Protein bildenden Aminosäuren zuständig ist, z. B. UUU oder UUC für Phenylalanin, für Alanin GCU oder GCC, GCA bzw. GCG. Die Folge derartiger Codons auf dem RNS-Abschnitt eines Gens bestimmt den Aufbau und damit Struktur und Funktion eines arteigenen bzw. individuell eigenen Polypeptids (Proteins).

- Bestimmte Polypeptide (Polymerasen) vermitteln an der Matrix des RNS-Strangs im Cytoplasma die Synthese einer Kopie zur Doppelhelix, in der Guanin G stets an das Nukleotid mit der Base C und Adenin A stets an U des neu entstehenden RNS-Strangs mittels H-Brückenbindung ankoppelt. Die anschließende Trennung der beiden Stränge und danach erneut einsetzende Synthese eines jeweils wieder komplementären RNS-Stranges ergibt Duplizierung und lässt unschwer erste Lebensformen erkennen, die in einer RNS-Welt entstanden (Bauer 2008, Bauer 2010). Zum Schutz und zur Stabilisierung der zur Replikation befähigten Gene, die bestimmte Abschnitte auf den Chromosomen bilden, dient die Speicherung der Information als Doppelhelix im Zellkern. Zugleich ist damit der Ersatz der Nukleotidbase U durch T und die Reduktion einer OH-Gruppe der Ribose zur Desoxyribonukleinsäure DNS verbunden. Die in der Abbildung 6 skizzierte Struktur der DNS-Doppelhelix als Erbinformation im Zellkern wurde von J. D. Watson und F. H. C. Crick 1953 aufgeklärt (Watson/Crick 1953).

- Die Aktivität der im Zellkern befindlichen Gene als DNS-Abschnitte, die nach Öffnen der Doppelhelix im betreffenden Bereich das Abgreifen einer RNS-Kopie für die Synthese bestimmter Proteine im Zellplasma programmieren, wird von der Zelle reguliert und liegt ebenfalls gespeichert vor. Jedem Gen ist ein Genschalter (Promotor) zugeordnet, der Signale von der Zelle empfängt, die Umwelteinflüsse, sog. „Stressoren“ einschließen können. Die Promotoren entscheiden darüber, welcher Funktionsmodus zum Tragen kommt, ob Blockade oder Aktivierung des Gens zur Synthese einer bestimmten RNS oder zur eigenen Duplizierung (Bauer 2008, Bauer 2010).

Es ist nach unserem Verständnis zweifellos höchst bewundernswert, dass sich unter dem Einfluss externer Einwirkung von Sonnenlicht auf dem Wasserplaneten Erde Molekülstrukturen herausbilden konnten, die zur Energiespeicherung in der Lage waren, sich zu periodischer Verknüpfung unter Bildung kettenförmigen Makromoleküle verbinden konnten und sich mittels weiterer katalytisch wirkender Polypeptide als replikationsfähig erwiesen. Aus einer vermutlich sehr großen Anzahl verschiedener molekularer Aggregationen in der „Ursuppe“ hat sich jene Tripeleinheit eines Nukleotids aus Ribose, Pyrimidin-, Purinbasen und Phosphorsäure offenbar als besonders erfolgreich durchsetzen können, um zum universellen Grundbaustein für alle Lebensformen auf unserem Planeten zu avancieren.

In Bakterien, z. B. Escherichia coli, beträgt die Generationszeit einer Verdopplung etwa 20 Minuten, was in Anbetracht von $4{,}72 \cdot 10^6$ Basenpaaren der Geschwindigkeit einer durch Polymerase katalysierten Verdopplung des Genstrangs von einigen 1000 Nukleotiden/s entspricht. Beim Menschen sind es aufgrund des viel größeren Genoms ca. 50-100 Nukleotiden/s bei einer Replikation der Zelle von ca.19,5 Stunden. Derartige Prozesse laufen im Takt ca. 10^{-3} bis 10^{-2} Sekunden ab Die Kenntnis der aktuellen Geschwindigkeit, mit der Atome und Moleküle chemische Bindungen knüpfen und lösen und wie rasch die Produktspezies aus dem mikroskopischen Umsetzungsknäuel entweichen, ist erst in neuerer Zeit mit Hilfe der Ultrakurzeitspektroskopie durch Auflösung bis in den Bereich einiger Femtosekunden (1fs = 10-15 s) erschlossen worden. Darüber wurde kürzlich zusammenfassend berichtet (Feltz 2023). 10^{15} fs entsprechen 31,5 Millionen Jahre, umfassen also die Zeit zurück bis ins mittlere Tertiär. Bei der Geschwindigkeit, mit der Bindungswechselwirkungen erprobt werden, wäre also seit dem geschätzten Aufkommen der oxygenen Photosynthese vor 2,3-2,4 Mrd. Jahren bis zum Nachweis erster Lebensformen

mit oxydativem Energiestoffwechsel vor ca. 1,5 Mrd. Jahren und in der Zeit danach hinreichend Zeit, um mittels „trial and error" einen Pfad zur Bildung einfachster Information speichernder Molekülstrukturen zu erschließen, und war eine Startkonfiguration gefunden, konnten die weiteren Elementarschritte vermutlich zielgerichteter und zunehmend effektiver verlaufen.

Unter dem Blickwinkel einer solchen Betrachtung ist es keineswegs abwegig, Information auf einen materiellen Ursprung zurückzuführen und nicht notwendig, aus der bewundernswerten Welt des Mikrokosmos auf einen göttlichen Impulsgeber zu schließen und dabei gestützt auf physikalische Erkenntnisse einen angeblichen Beweis der Existenz Gottes abzuleiten, wie man es bei W. Gitt in „Herkunft des Lebens aus der Sicht der Information" nachlesen kann (Gitt 2002). Ebenso wird die Physik von J. Starkmuth in „Die Entstehung der Realität – Wie das Bewusstsein die Welt erschafft" missbraucht (Starkmuth 2005).

Am Anfang war das materielle Sein. Aus ihm heraus entwickelte sich die belebte Natur und mit ihr kam die Information und schließlich das menschliche Bewusstsein in unsere Welt.

Bibliographie

Bauer, Joachim (2008): *Das kooperative Gen: Abschied vom Darwinismus*. Hoffmann und Campe, Hamburg.

Bauer, Joachim (2010): *Das kooperative Gen – Evolution als kreativer Prozess*. Heyne Verlag, München.

Czaja, Andrew D. / Johnson, Clark M. / Beard, Brian L. / Roden, Eric E. / Li, Weiqiang / Moorbath, Stephen (2013): „Biological Fe Oxidation Controlled Deposition of Banded Iron Formation in the ca. 3770 Ma Isua Supracrustal Belt (West Greenland)". *Earth and Planetary Science Letters* 363, 192–203.

El-Shishtawy, Reda M. / Haddon, Robert C. / Saleh H. Al-Heniti, Saleh H. / Raffah, Bahaaudin M. / Berrada, K. / Abdel-Khalek, S. / Al-Hadeethi, Yas (2018): „Quantum Transfer Energy in the Framework of Time-dependent Dipole-dipole Interaction". *Results in Physics* 8, 89–92.

Feltz, Adalbert (2019): „Quantenverschränkung ein Werkzeug der Evolution?" *Leibniz Online* (Internetzeitschrift der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin e.V.) 36.

Feltz, Adalbert (2023): „Über zeitliche Proportionen der in uns ablaufenden Prozesse". *Leibniz Online* (Internetzeitschrift der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin e.V.) 51.

Gitt, Werner (2002): *Herkunft des Lebens aus der Sicht der Information*. 3. überarbeitete und erweiterte Auflage, Holzgerlingen: Hänssler-Verlag.

Olsen, John M. (2006): „Photosynthesis in the Arechean Era". *Photosynthesis Research* 88, 109.

Sarovar, Mohan / Ishizaki, Akihito / Fleming, Graham R. / Whaley, Brigitta (2010): „Quantum Entanglement in Photosynthetic Light-harvesting Complexes". *Nature Physics* 6, 462–467.

Starkmuth, Jörg (2005): *Die Entstehung der Realität – Wie das Bewusstsein die Welt erschafft*. Verlag Starkmuth Publishing (Eigenverlag).

Watson, J. D. / Crick, F. H. C. (1953): „Molecular Structure of Nucleic Acids: A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid". *Nature* 171, 737–738.

Wikipedia-Begriffe: Calvin-Zyklus, Chloroplast, Chronologie der Erdgeschichte, Information, Photosynthese, Quantenverschränkung (letzter Zugriff 18.02.2025).

E-Mail-Adresse des Verfassers: adalbert.feltz@aon.at

Leibniz Online, Nr. 56 (2025)
Zeitschrift der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin e. V.
ISSN 1863-3285 • DOI: 10.53201/LEIBNIZONLINE56

Zur Rolle der Entropieproduktion bei Umweltschäden durch Explosivstoffe

Peter J. Plath und Ernst-Christoph Haß
(beide MLS, Lychen und Seddin)

Veröffentlicht: 20. Juni 2025

Abstract
The great discrepancy between the demands for ever more and even more effective weapons for the victorious peace of the Ukrainians to their conditions on the one hand, and the simultaneous demand to achieve the CO_2 climate targets and to limit global warming on the other, has prompted us since the beginning of the war in Ukraine to consider the problem of the impact of environmental damage caused by explosives from a physical-chemical perspective. For selected examples of the artillery munition being used, the CO_2 production during their explosion is examined. Since the purpose of the explosions of these munitions is to destroy the respective target as completely as possible, the associated entropy production is of crucial importance for environmental damage and man-made global warming. In order to make the connection between destruction and entropy production comprehensible, we go back to the concept of disgregation introduced by R. Clausius, according to which the effect of heat always means an increase in the separation of the cohesion of substances. Every destruction, that is every decomposition or disgregation of a substance into particulate matter is associated with the generation of heat and thus entropy, i.e., a reduction in the quality of the used energy. These concepts are first explained using examples from everyday life before we use them to discuss the destructive effect of explosive weapons in more detail. The detonation of bombs or grenades is causally connected with an extreme heat development and thus with a deadly heat radiation that spreads with the speed of light. An entropy production can be assigned to this thermal radiation, which is propagated by photons of very long-wave electromagnetic radiation. In this way, today's wars not only contribute significantly to damaging the Earth's climate through the increased CO_2 production and particulate matter generation they cause, but above all through their enormous entropy production.

Zusammenfassung
Die große Diskrepanz zwischen den Forderungen nach immer mehr und noch wirksameren Waffen für den Siegfrieden der Ukrainer nach ihren Bedingungen einerseits und der gleichzeitigen Forderung, die CO_2-Klimaziele zu erreichen und die Erderwärmung zu begrenzen, andererseits, hat uns bereits seit Beginn des Krieges in der Ukraine veranlasst, uns mit dem Problem der Auswirkungen von Umweltschäden durch eingesetzte Sprengstoffe aus physikalisch-chemischer Sicht zu befassen. Anhand ausgewählter Beispiele für die verwendete Artilleriemunition wird die CO_2-Produktion bei deren Explosion untersucht. Da der Zweck der Explosionen dieser Munition darin besteht, das jeweilige Ziel möglichst vollständig zu zerstören, ist die damit verbundene Entropieproduktion von entscheidender Bedeutung für die Schädigung der Umwelt und die vom Menschen verursachte globale Erwärmung. Um den Zusammenhang zwischen Zerstörung und Entropieerzeugung verständlich zu machen, greifen wir auf den von R. Clausius

eingeführten Begriff der Disgregation zurück, wonach die Wirkung von Wärme stets eine Zunahme der Auflösung des Zusammenhalts von Substanzen bedeutet. Jede Zerstörung, also jede Zerlegung, bzw. Disgregation eines Stoffes in Feinstaub ist mit Erzeugung von Wärme und damit Entropie verbunden, also einer Verminderung der Wertigkeit der eingesetzten Energie. Diese Begriffe werden zunächst an Beispielen aus dem Alltagsleben erläutert, bevor wir mit ihnen die zerstörerische Wirkung der Explosivwaffen genauer diskutieren. Das Detonieren von Bomben oder Granaten ist ursächlich verbunden mit einer extremen Hitzeentwicklung und damit mit einer sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitenden tödlichen Wärmestrahlung. Dieser Wärmestrahlung, die sich durch Photonen einer sehr langwelligen elektromagnetischen Strahlung ausbreitet, kann eine Entropieproduktion zugeordnet werden. Auf diese Weise tragen heutige Kriege nicht nur über die mit ihnen verbundene erhöhte CO_2-Produktion und Feinstauberzeugung, sondern vor allem auch mit ihrer gewaltigen Entropieproduktion maßgeblich zur Schädigung des Klimas der Erde bei.

Keywords / Schlüsselwörter
Explosive munition, environmental damage, disgregation of matter, Disgregation, decomposition entropy, distribution entropy, degeneration of energy, particulate matter, heat radiation, limits of global entropy production
Explosivmunition, Umweltschäden, Zerkleinerungsentropie, Verteilungsentropie, Entwertung von Energie, Feinstaub, Wärmestrahlung, Grenzen der weltweiten Entropieproduktion

1. Vorbemerkungen

1.1. Munitionsverbrauch und Kosten des Ukraine-Kriegs – Ein Rückblick auf das Jahr 2023

Im Krieg ist das erste Opfer die Wahrheit (Aischylos, 525–456 v. u. Z).

Vernebelnde Nachrichten aus dem Krieg in der Ukraine, über die Zerstörung des Staudamms am Kachowkaer Stausee am 6. Juni 2023 (Wikipedia, „Zerstörung des Kachowka-Staudamms“, 2023; südlich gelegener Stausee des Dnjepr bzw. Dnipro; letzte der sechs Staustufen) überschwemmten uns im Kriegsjahr 2023 tagtäglich. Vor allem wurde uns mitgeteilt, dass täglich bis zu ca. 10 Zivilisten in der Ukraine durch Raketenangriffe der russischen Armee zu Tode kämen. Ukrainische Soldaten aber seien unverwundbar – jedenfalls erfuhren wir darüber praktisch nichts. Sie waren fast immer erfolgreich auf Grund der vielen Waffen, die die USA, Deutschland bzw. die EU ihnen lieferten. Und die Bundesregierung wolle immer mehr und bessere, also zerstörerische Waffen und Munition liefern, bis die Ukraine einen Frieden schließen könne – aber nicht zu russischen Bedingungen. Merkwürdigerweise vernichteten unsere treffsicheren Waffen auch nur Waffen, militärische Stellungen und Munitionslager der Russen.

Zivilisten, Dörfer, Innenstädte, normale Industrieanlagen – all diese werden auf Grund der verwendeten „Präzisionswaffen“ nicht (in größerem Maße) getötet oder zerstört. Der Sinn des Einsatzes von Explosivwaffen ist die Vernichtung des jeweiligen Gegners und damit die vollständige Zerstörung all seiner militärischen und wirtschaftlichen Möglichkeiten zur potentiellen Gegenwehr u.a. mittels Explosivwaffen. Dass dabei aber nicht nur der Gegner vernichtet wird, sondern in nicht unmaßgeblicher Weise auch die jeweils beteiligte, kriegsführende Partei selbst, gerät dabei außer Sicht. Was aber gar nicht erst betrachtet wird, das sind die Klimaschäden, die mit dem vollumfänglichen Einsatz von Explosivwaffen unweigerlich verbunden sind. Wir haben darauf bereits früher hingewiesen (Ebeling et al.

2023). Am Beispiel des Ukrainekrieges wollen die Autoren im Folgenden durch einen kurzen Rückblick auf das Kriegsjahr 2023 in möglichst rationaler Weise auf diese Klimaschäden eingehen.

> „In ihren Abwehrbemühungen gegen den russischen Angriffskrieg verbraucht die Ukraine täglich riesige Mengen an Munition. Laut eines Berichts der „Financial Times" (FT) beläuft sich der Verbrauch Tag für Tag auf 5000 bis 6000 Artilleriegeschosse – so viel wie ein kleines europäisches Land in Friedenszeiten pro Jahr bestellen würde." (Redaktionsnetzwerk Deutschland, 8.2.2023)
>
> „In der Spitze verschossen die Russen 40.000 bis 50.000 Artilleriegeschosse täglich, während die Ukrainer 6000 bis 7000 Projektile pro Tag verbrauchten; weite Gebiete im Osten der Ukraine gleichen inzwischen Kraterlandschaften. Analysten schätzen, dass die russischen Streitkräfte derzeit noch etwa 10.000 Granaten pro Tag abfeuern, die ukrainischen etwa 3.000. … Das Problem scheint allerdings weniger die Finanzierung zu sein, denn die Kapazitäten: Europas Rüstungsindustrie ist auf Friedenszeiten eingestellt und nicht auf Kriegsproduktion. Pro Jahr werden etwa 300.000 Artilleriegeschosse vom Kaliber 155 Millimeter hergestellt. Die Ukraine verbraucht dies innerhalb von drei Monaten. Ihren jährlichen Bedarf an Artilleriemunition beziffert sie auf rund eine Million Schuss. … Die russischen Streitkräfte verbrauchen durchschnittlich zwischen **20.000** und **60.000 Artillerie-Geschosse täglich.** Ihren Verbrauch sollen sie nun auf 10.000 Granaten pro Tag reduziert haben. Das ukrainische Militär verbraucht dagegen zwischen **2.000** und **7.000 Geschosse pro Tag**. Aktuell wären sie auf etwa **3.000 Geschoss täglich** reduziert. Die EU-Staaten produzieren etwa **20.000 Granaten pro Monat**. Armin Papperger, Chef von Deutschlands größtem Rüstungskonzern Rheinmetall, ließ jüngst wissen, dass sein Konzern im Stande wäre, die Hälfte des ukrainischen Bedarfs zu decken. ‚Wir können von 300.000 auf 450.000 Schuss hochfahren', zitiert ihn das ZDF. In puncto Panzermunition liege die aktuelle Kapazität bei 240.000 Schuss pro Jahr. In einem Interview mit der NZZ weist er aber auch darauf hin, dass der Konzern noch andere Kunden bedienen müsse." (Lumetsberger 2023).
>
> „Die **Mittel der Ertüchtigungsinitiative** der Bundesregierung belaufen sich allein für das Jahr 2024 auf etwa 7,1 Milliarden Euro. Hieraus fließen auch die deutschen Beiträge an die Europäische Friedensfazilität (EPF) der Europäischen Union. … Hinzu kommen **Verpflichtungsermächtigungen** für die Folgejahre in Höhe von derzeit etwa 6 Milliarden Euro." (Die Bundesregierung 2025)
>
> „Bislang sind bereits circa 5 Milliarden Euro (2023) und circa 1,6 Milliarden Euro (2022) in die militärische Unterstützung der Ukraine geflossen; weitere 2,9 Milliarden Euro sind in den ersten beiden Kriegsjahren als Verpflichtungsermächtigungen ergangen für Lieferungen, die erst in den Jahren 2025 bis 2028 ergehen werden." (Die Bundesregierung 2025)
>
> „Insgesamt hat Deutschland inzwischen Militärhilfen in Höhe von etwa 28 Milliarden Euro für die Unterstützung der Ukraine zur Verfügung beziehungsweise für die kommenden Jahre bereitgestellt." (Die Bundesregierung 2025)

Geld für diese großen Waffenmengen steht uns in nahezu unbegrenzter Menge zur Verfügung, welches wir auch bereitwillig der Ukraine zur Verfügung stellen, damit sie unsere Waffen kaufen kann. Geld entsteht aus dem Nichts bekanntlich durch die Vergabe von

Krediten (ARTE.tv 2022)), an denen insbesondere die Kreditgeber verdienen. Probleme entstehen dann, wenn sich die Kreditgeber aus dem Geschäft zurückziehen, weil sie die Rückzahlung der Kredite als nicht mehr gewährleistet betrachten, da der Kreditnehmer seine Schulden nicht mehr bezahlen kann. Für den Wiederaufbau der bereits durch die Kriegskredite hoch verschuldeten Ukraine wird seitens der Weltbank heute ein Betrag von ca. 360 Milliarden veranschlagt. Könnte es sein, dass die durch diesen Krieg hervorgerufenen Umwelt- und Klimaschäden nur noch als vernachlässigbare Kollateralschäden betrachtet werden?

> „Deutschland ist der größte militärische Geldgeber der Ukraine in Europa und steht weltweit nach den USA an zweiter Stelle. Nach Angaben des Kieler Instituts für Weltwirtschaft hat Deutschland bislang mehr als 17 Milliarden Euro an Militärhilfe für die Ukraine bereitgestellt. Dazu gehören "Leopard 2"-Kampfpanzer, "Marder"-Schützenpanzer, "Iris-T-" und "Patriot"-Raketen-abwehrsysteme, "Gepard"-Flugabwehrkanonen und Mehrfachraketen-werfer.“ (Tagesschau 12.11.2023)

Nach dem ‚Ukraine Support Tracker‘ des Instituts für Weltwirtschaft (IfW 05.12.2024) Kiel hat Europa vom 24.01.2022 bis 31.10.2024 insgesamt 124,7 Milliarden Euro als Unterstützung für die Ukraine zugewiesen und weitere 115,9 Milliarden Euro Hilfeleistungen zugesagt. Das zeigt deutlich, dass die EU davon ausgeht, dass die Ukraine, sollte sie im Sinne ihrer Kriegsziele gewinnen, aus heutiger Sicht noch kreditwürdig ist. Anders ausgedrückt, das könnte heißen, man ist gewillt, den bestehenden Stellungskrieg fortzuführen, denn von einem möglichen Einfrieren der bisherigen militärischen Lage ist nicht die Rede.

Die Problematik auf dem Schlachtfeld wird aber wesentlich auch durch die Menge an Munition bestimmt, die beide Seiten tagtäglich einzusetzen vermögen. In diesem Zusammenhang ist es erwähnenswert, dass Rheinmetall nach einer Mitteilung von ntv vom 2.2.2024 beschlossen hat, ab 2025 in Niedersachsen eine neue Munitionsfabrik mit einer Kapazität von 200.000 Schuss Artillerie Munition entstehen zu lassen. (ntv 02.02.2024).

> „Die Beschaffungsagentur der Nato (NSPA) hat mit Unternehmen aus Deutschland und Frankreich Rahmenverträge über die Lieferung von Artilleriemunition im Wert von rund 1,1 Milliarden Euro abgeschlossen. Die 155-Millimeter-Geschosse sollen in Waffensystemen vom Typ Caesar und Panzerhaubitze 2000 eingesetzt werden können, wie die NSPA mitteilte. Beide werden auch von der Ukraine im Abwehrkrieg gegen Russland genutzt.
>
> Die Firmen, die die Verträge erhalten haben, sind den Angaben zufolge das französische Unternehmen Nexter Munitions (KNDS) und das deutsche Unternehmen Junghans Microtec. Letzteres stellt in Dunningen in Baden-Württemberg Zünder für Artilleriemunition her. Nach Angaben aus Bündniskreisen soll die Vereinbarung die Beschaffung von mehr als 220.000 Geschossen ermöglichen. Die ersten Lieferungen werden nach Angaben von NSPA-Generaldirektorin Stacy Cummings in etwa 24 Monaten erfolgen können.“ (SPIEGEL Ausland 23.01.2024)

Diese Situation erinnert doch stark an den verheerenden Stellungskrieg zwischen Frankreich und Deutschland im ersten Weltkrieg. Damals versuchte man, mit immer neueren Waffensystemen die Situation zu ändern und wieder in die Offensive zu gelangen. Das ist auch heute nicht viel anders. Tagtäglich werden neue Waffen ausprobiert und mit viel Getöse als sogenannte „game changer“ der staunenden Öffentlichkeit präsentiert, um damit die Fortführung des Krieges zu rechtfertigen. Die Einführung der KI (künstliche Intelligenz) gilt momentan als der letzte Schrei der „erfolgreichen Kriegsführung“ und man erhofft sich damit die Luft- und insbesondere die „Ätherhoheit“ zu erlangen. Aber wie Mark Episkopos

am 3. Februar 2024 feststellte, gibt es „keine US-Zauberwaffe mehr für einen offensiven Sieg in der Ukraine“, denn „die Russen haben sich an alle westlichen Waffen angepasst. Das muss anerkannt werden. Ansonsten setzt man das Schicksal einer Nation aufs Spiel.“ (Episkopos 2024)

1.2. Explosivmunition

Explosivmunition: Darunter versteht man Geschosse, bei denen eine Explosion durch Auftreffen auf dem Ziel erfolgt oder kurz zuvor ausgelöst werden kann. Geschosse dieser Art wurden zuerst im ersten Weltkrieg im militärischen Bereich in großem Maße eingesetzt. Hierzu zählen alle Arten von Granaten, Bomben und Minen. Geschosse, die allein durch ihren Aufprall eine explosionsartige Zerstörung des Targets verursachen, gehören nicht zur Klasse der Explosivmunition, die durch einen chemischen Explosivstoff wie z.B. TNT selbst zur Explosion gebracht werden.

Selbstverständlich ist beabsichtigt, falls im Sinne der Kriegsziele erforderlich, all diese Munition in Einsatz zu bringen. Viele Granaten, Bomben, Minen und Geschosse davon werden ihre Ziele erreichen und durch ihre Explosionskraft wie gewünscht erhebliche Zerstörungen verursachen. Dabei ist in der Regel alles, was beim jeweiligen Gegner getroffen und vernichtet wird, ein militärisches Ziel gewesen. Viel Munition aber auch werden auf „Nimmerwiedersehen“ im Erdboden oder auf dem Meeresgrund verschwinden, vergraben oder versenkt, ohne zu explodieren. Nichtsdestotrotz verliert diese Explosivmunition nichts an ihrer zerstörerischen Kraft. Zerstörte Städte, Dörfer und Industrieanlagen, verkrüppelte und getötete Menschen sowie Umweltschäden bleiben nach jedem Krieg zurück.

1.3. Umweltschäden – Ein Beispiel: Der Stellungskrieg 1914–1918

In einem Artikel des französischen ‚Ministère des Armées‘ zu den Spätfolgen des 1. Weltkriegs auf die Umwelt wird versucht, den langen Weg der Bewusstwerdung von dessen ökologischen Folgen nachzuzeichnen (Ministère des Armées 2003):

Abb. 1 Bauern ziehen mit dem Pflug eine großkalibrige Granate mit 350 mm aus dem Feld (bei Coucy Le Chateau). (Ministère des Armées 2003)

„In den vier Jahren des „Großen Krieges“ wurden an einer 700 km langen und nur einige Kilometer breiten Frontlinie zwischen Frankreich und Deutschland etwa 1 Milliarde Stück Munition jeder Art abgefeuert. Jedoch haben 20 bis 30%

> dieser Geschosse nicht richtig funktioniert. Einige nicht explodierte Sprengkörper wurden während des Konflikts oder gleich danach eingesammelt, wenn sie sich an der Oberfläche befanden. Viele sind jedoch unterschiedlich tief in den Boden eingedrungen, manchmal bis zu zehn Meter …"
>
> „… Zu den abgefeuerten, aber nicht explodierten Sprengkörpern des Krieges muss man noch mehr als 1,7 Millionen Tonnen Munition hinzuzählen, die nicht verwendet oder zurückgeholt wurde. Sie ist laut dem Geologen und Umweltwissenschaftler Daniel Hubé ein wahres „Chemielager", von dem man erst vor kurzem erfuhr. 4,5 % dieser Granaten können Giftstoffe wie Phosgen, Arsen oder auch Senfgas enthalten. Auch wenn es heute schwierig ist, die Auswirkungen einzuschätzen, die diese „Zeitbombe" eines Tages auf das Grundwasser haben könnte, das zur Korrosion der Metallhüllen der Munition führt, die eine Dicke von 1 bis 6 cm haben, ist es interessant, die verschiedenen Ereignisse vor Augen zu führen, die es ermöglichten, davon zu erfahren."

Das Problem ist bis heute nicht gelöst (s. z.B. Abb. 1), denn es wurde erst vor wenigen Jahren damit begonnen, die Auswirkungen des Krieges von 1914–1918 auf die Umwelt zu untersuchen.

Bezogen auf den 2. Weltkrieg 1939–1945 stellt Professor Edmund Maser, Direktor des Instituts für Toxikologie am Universitätsklinikum in Kiel fest: „Wir fangen jetzt erst an, uns um die Munition im Meer zu kümmern." (FOCUS online 06.03.2023)

> „Allein auf dem Meeresboden der deutschen Teile der Nord- und Ostsee rosten 1,6 Millionen Tonnen Kriegsmunition vor sich hin, erzählt Maser. Die Zersetzung entlässt einen Giftcocktail ins Wasser, der das Ökosystem des Meeres gefährdet und letzten Endes auf dem Teller derer landet, die Fisch und Meeresfrüchte essen. **TNT ist krebserregend**." (FOCUS online 06.03.2023)

Erst vor kurzem erschien in der ZEIT ein ausführlicher Bericht über die gesundheitlichen Risiken durch die Munitions-Altlasten auf dem Grund von Nord- und Ostsee (Kiel 20.03.2025).

Auch die moderne Kriegsmunition enthält Blei, Quecksilber und TNT. Selbst wenn der Krieg in der Ukraine heute zu Ende ginge, diese giftigen Schwermetalle und Sprengstoffe bleiben – mit ungewissen Folgen für Mensch, Tier und Natur. „Nach vorläufigen, allgemeinen Schätzungen belaufen sich die Schäden und Verluste für den Bodenfonds und die Böden der Ukraine auf insgesamt über 15 Milliarden US-Dollar, sagen die Fachleute vom Sokolowskyj-Institut und betonen die Vorläufigkeit dieser Schätzungen besonders deutlich." (FOCUS online 06.03.2023)

Was nun die Vernichtung von Menschen durch moderne Explosivmunition betrifft, führen W. Ebeling und R. Feistel in ihrem Artikel „Selbstorganisation in Natur und Gesellschaft und Strategien zur Gestaltung der Zukunft" am Beispiel des Irak-Krieges aus:

> „Im Irak-Krieg wurden 2003 in nur 2 Monaten mehr Sprengstoffe eingesetzt als im ganzen 20. Jahrhundert. Unter den Verlusten an Leben, die von der Presse gemeldet wurden, waren 30 Briten, 130 Amerikaner, 200 Journalisten und 1 Million Zivilisten nicht genannter Nation. In Libyen wurden 20.000 Lufteinsätze der NATO geflogen, und die Verluste waren nicht wesentlich geringer." (Ebeling / Feistel 2017)

Bevor wir an einigen Beispielen näher auf die Wirkung einzelner Explosivstoffe, insbesondere auch auf das für alle Explosivstoffe als Referenz dienenden Trinitrotoluol (TNT) eingehen, betonen wir, dass ihre Auswirkung auf das Klima sich nicht allein auf den Einsatz dieser Sprengstoffe in Granaten oder Bomben in militärischen Konflikten beschränkt, sondern schon mit ihrer Herstellung beginnt. Überschlagsmäßig lässt sich dieser

Teil des durch sie angerichteten Klimaschadens durch die Herstellungskosten ermitteln. So kostet beispielsweise eine Granate für den Leopard 2 ca. 9000,- € (15.3.2023). Nun soll die die Ukrainische Armee in nur einem Monat so viel Munition einsetzen wie ihrer Produktion in den USA vor dem Ukrainekrieg in einem ganzen Jahr entspricht (Fürthauer 2023). Die Ukraine verfeuere pro Tag 7000 Stück Munition, die russische Armee jedoch 25000 (ZDFheute 2023). d.h. ca. 300 Millionen € pro Tag! Es liegt außerhalb unserer Kompetenz, die genauen Zahlen der finanziellen und ökonomischen Folgen abzuschätzen, aber es ist gewiss, dass die Summen für den Einsatz von Munition im Ukrainekrieg pro Jahr im zweistelligen Milliardenbereich an Euro (€) liegen (Statista 2024).

Da man heute gewöhnlich Klimaschäden, die durch Prozesse jeglicher Art verursacht werden, durch die dabei freigesetzte die Menge an Kohlendioxid CO_2 – bzw. an entsprechenden CO_2-Äquivalenten misst, verweisen wir diesbezüglich erneut auf die Aussage von L. de Klerk hin. Die niederländische Gruppe um den Klimaforscher Lennard de Klerk beklagt, dass sich mit dem ökologischen Fußabdruck von Kriegen bisher noch kaum jemand beschäftigt habe (de Klerk 2022, 2023.

Eine Untersuchung durch sein internationales Forschungsteam kam nun zu dem Schluss, dass allein im ersten Jahr des Ukrainekriegs rund 120 Millionen Tonnen CO2-Emissionen-Äquivalente freigesetzt wurden – das entspricht dem jährlichen Treibhausgasausstoß eines mittelgroßen europäischen Landes wie Belgien (Ebeling et al. 2023).

Die Vorbemerkungen zur Explosionsmunition abschließend, betonen wir noch einmal, dass wir es hierbei mit einer riesigen Produktion in der Metall- und Chemieindustrie zu tun haben, die gewaltige Auswirkungen auf das Erdklima hat! Darüber hinaus dienen die Produkte dieser Produktion ausschließlich der Vernichtung – bei Zerstörung aller Strukturen, auf die sie treffen. Das ist eine fast unvorstellbare Degradierung von wertvoller Energie und damit verbundener Erzeugung von Entropie.

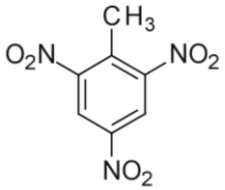
Wie lange noch? Na, bis zum endgültigen Sieg und einem Frieden nach „unseren“ Bedingungen.

2. Sprengstoffe und ihr TNT-Äquivalent

2.1. Beispiel: Trinitrotoluol

Wie bereits im Artikel „Selbstorganisation in Natur und Gesellschaft und Strategien zur Gestaltung der Zukunft“ von Werner Ebeling und Rainer Feistel beschrieben, zerstört 1 t TNT konservativ geschätzt einen Würfel mit einer Kantenlänge von 10 m, d.h. etwa 1000 Kubikmeter Gebäude von der Größe eines Einfamilienhauses. Dabei wird alles organische Material verbrannt. Die Sprengung wird ausgelöst durch eine Zündung. Dabei wird eine große Menge Energie freigesetzt und aufgrund der in extrem kurzer Zeit entstehenden Gase ergibt sich eine ungeheure Sprengkraft.

Die Strukturformel von TNT lautet:



und die Summenformel: $C_7H_5N_3O_6$.

Dazu steht in Wikipedia:

> „Aus chemischer Sicht spricht man bei der Explosion von einer intramolekular sehr schnell und exotherm ablaufenden Redoxreaktion, die durch eine Initialzündung gestartet wird. Die entstehenden stabileren und energieärmeren

Produkte sind z. B. Stickstoff, Kohlenstoffdioxid, Methan, Kohlenmonoxid und Cyanwasserstoff. Letztere Produkte können wegen des zu geringen Sauerstoffanteils im Molekül entstehen.“ (Wikipedia, „Trinitrotoluol“, 2023)

Entsprechend der Reaktionsgleichung unter Annahme von zusätzlichem O_2 aus der umgebenen Luft und vollständiger Verbrennung zu H_2O, CO_2 und N_2,

$$4\ C_7H_5N_3O_6 + 21\ O_2 \rightarrow 10\ H_2O + 28\ CO_2 + 6\ N_2,$$

liefert 1 Mol TNT also 2,5 Mol Wasser, 7 Mol Kohlendioxid und 1,5 Mol Stickstoff, also 11 Mol Gas.

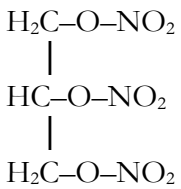
Die dabei freigesetzte Energie, beträgt pro Mol TNT ca. 250 kcal/Mol (ca.1050 kJ/Mol). Bezieht man es auf die Masseneinheit Kilogramm, ergibt sich eine Energiedichte von ca. 1100 kcal/kg (4,6MJ/kg) (Wikipedia, „TNT-Äquivalent“, 2023). Der Brennwert von Holz ist jedoch 3- bis 4-mal so groß (Wikipedia, „Trinitrotoluol“, 2023) und ohne Zündung würde das TNT auch gar nicht explodieren, sondern einfach abbrennen. Wird aber mit einer entsprechenden Zündung eine ausreichende Menge TNT gezündet, dann entsteht über eine wärmegekoppelte, autokatalytische Reaktion eine sehr schmale Reaktionswelle (Frontwelle), die sich mit hoher Geschwindigkeit (6900 m/s) im TNT ausbreitet. In ihr wird eine extreme Wärme erzeugt sowie momentan ein großes Volumen durch die entstehenden Gase. Es entsteht dadurch eine gewaltige, heiße Druckwelle.

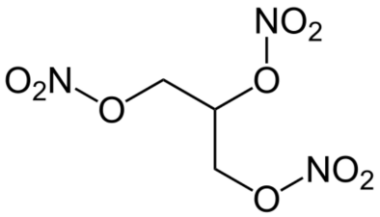
Berücksichtigt man, dass bei Normaltemperatur und Atmosphärendruck 1 Mol eines Gases ein Volumen von 22,4 l (Normalgasvolumen) einnimmt, so lässt sich in etwa die große Explosionskraft abschätzen. Pro Kilogramm TNT entstehen in Millisekunden auf diese Weise 975 Liter (Normalgasvolumen) Gase. Das Volumen nimmt näherungsweise linear mit der Temperatur zu. Die dabei freigesetzte Energie, beträgt pro Mol TNT ca. 250 kcal/Mol (ca.1050 kJ/Mol), bzw. 1 kg TNT erzeugt ca. 1000 kcal/kg.

2.2. Beispiel: Nitroglycerin

(Wikipedia, „Nitroglycerin“, 2023):

Strukturformel:





Eigenschaften:

- Art: Sekundärsprengstoff (Wikipedia 2022)
- Explosionswärme (Wikipedia 2023): 6,264 $kJ \cdot g^{-1}$ (27,58 J/mol)
- Detonationsgeschwindigkeit (Wikipedia, 2021): 700–8500 m/s (7600 m/s
- Dichte: 1,599 g/cm^3
- Schlagempfindlichkeit (Wikipedia, 2021): 0,2 J

Nitroglycerin (Glycerintrinitrat) explodiert bereits bei einem Fallhammerversuch mit einem 2-kg-Fallhammer aus einem Zentimeter Höhe. (Wikipedia).

Bei der Explosion oder beim Zerfall von Glycerintrinitrat entstehen aus chemischer Sicht in einer intramolekularen Redoxreaktion – mit den Nitrogruppen als Oxidationsmitteln und den C-Atomen als Reduktionsmitteln – die Reaktionsprodukte Kohlendioxid, Wasser, Stickstoff und Stickstoffmonoxid: (Wikipedia).

$$4\ C_3H_5N_3O_9(l) \rightarrow 12\ CO_2(g) + 10\ H_2O(g) + 5\ N_2(g) + 2\ NO(g).$$

1 Mol Nitroglycerin liefert also 3 Mol Kohlendioxid, 2,5 Mol Wasser, 1,25 Mol Stickstoff und 0,5 Mol Stickstoffmonoxid.

Die vollständige Umwandlung des flüssigen Sprengstoffes in extrem kurzer Zeit in Produkte, die bei hoher Temperatur gasförmig sind, führt zu einer massiven Volumenausdehnung, das heißt zu hoher Sprengkraft (Wikipedia).

Heutige Granaten haben einen anderen Sprengstoff als TNT bzw. Nitroglycerin.

Aus der Anzahl der Mole Sprengstoff in einer Granate und der Anzahl der Granaten kann die Sprengkraft berechnet werden. Beim Abfeuern der Granate entsteht eine ungeheure kinetische Energie, damit ein Geschoss z.B. 70 km weit fliegt. Aus dem Gewicht der Granate und ihrer Reichweite kann die Kraft berechnet werden, die benötigt wird um die Granate abzuschießen. Die Reichweite wird im konventionellen Fall durch eine Explosion bei der Zündung in der Waffe erzeugt.

Zusätzlich zur Energiebilanz für den Abschuss von Granaten ist auch der Energieaufwand für die Panzer und Panzerhaubitzen zu berücksichtigen.

3. Zerstörungswirkung und Umweltschäden durch Granaten

In der Regel gibt es beim Einschlag einer Granate nicht nur mechanische Zerstörung, sondern es entstehen auch Brände. Der Einschlag erzeugt in aller Regel ein Feuer, d.h. die Einschlaglöcher sind immer verbrannt. Durch die Granaten wird nicht nur das Haus zerstört und muss wiederaufgebaut werden, sondern es wird auch die dort befindliche Fläche (Landschaft einschließlich der Pflanzen und Tiere) auf lange Zeit zerstört und für die weitere land- bzw. forstwirtschaftliche Nutzung unbenutzbar gemacht – es entsteht eine neue Wüste! **Das sind Klimaschäden**, auch wenn sie erst einmal scheinbar nur als Umweltschäden erkennbar sind!

Der dabei entstehende Feinstaub ist ebenfalls zu 100% ein Klimaschaden. So war z.B. beim Anschlag auf die Twin Towers des World Trade Centers in New York am 11.09.2001 eine große Staubwolke zu sehen. Auch bei den in Brand geschossenen Öllagern im Irakkrieg 2003 gab es riesige Rauchschäden. Dabei stellt sich nicht nur die Frage, um welche Art von Feinstaub es sich handelt – um sandartigen Feinstaub, um rußartigen oder gar um radioaktiven Feinstaub, wie im Fall des Unglücks von Tschernobyl oder bei „schmutziger Munition“. Es muss auch gefragt werden, wie fein der Feinstaub zerstäubt wurde.

Bei einer Explosion werden die Gase nicht bei Raumtemperatur freigesetzt. Die kinetische Energie von Geschossen ist so groß, dass beim Aufprall hohe Temperaturen entstehen. Selbst bei normalen Temperaturen wäre die ganze mechanische und Volumenenergie bei der plötzlichen Ausdehnung frei geworden. Wie bei einer Staublawine wird durch die ungeheuren Druckunterschiede jegliches Leben getötet, die Lungen zerrissen. Das ist auch ein direkter **ökologischer Schaden**: Der Feinstaub ist ein Klimakiller.

Es lässt sich die Druckwelle berechnen, wenn durch eine Explosion mit einer Sprengkraft, die 1 t TNT entspricht, ein Gebäude der Größe 10 x 10 x 10 m^3 zerstört wird. Der dabei entstehende Feinstaub kann, wenn er fein genug ist, große Höhen erreichen. Aber es genügt schon, wenn der Feinstaub durch den Luftstrom nur einige 100 m Höhe erreicht, um über große Bereiche getragen zu werden. Sandstürme in der Sahara bewegen sich beispielsweise über große Entfernungen bis nach Südamerika und über die Alpen bis nach Deutschland. Das bedeutet, die Explosionen und deren Wirkung sind nicht nur lokaler Natur. Bei der Nuklearkatastrophe von Tschernobyl, der Explosion eines Nuklearreaktors am 25. April 1986, wurden die in die Atmosphäre gelangten radioaktiven Stoffe durch die Luftströmung hauptsächlich in die Region nordöstlich von Tschernobyl bis nach Deutschland und Schweden getragen und gelangten durch Windverfrachtung in viele weitere Länder in Europa (Wikipedia, „Nuklearkatastrophe von Tschernobyl“, 2023).

Viele Fragen sind hier noch offen; das muss erforscht werden. Man kann es als ein Verbrechen an der jeweiligen Bevölkerung bezeichnen, dass sich das IPCC (der Klima-Rat, Klimapanel) bisher nicht damit befasst. (In dem 3068 Seiten langen Report des IPCC „Climate Change 2022: Impacts, Implementation and Vulnerability – Working Group II" kommt das Wort ‚Tschernobyl' kein einziges Mal vor.) Unabhängig davon, dass durch die Kriegseinwirkungen vor Ort sehr viele Menschen unmittelbar sterben, wirkt sich die Feinstofferzeugung auch auf Menschen, die weit entfernt leben, durch die so verursachten Klimaschäden aus.

Die EU und die USA liefern jetzt im Ukraine-Krieg Abwehrsysteme, die eine Reichweite von 200 km haben. Durch diese und die Panzerarmeen entstehen ökologische Schäden auf der ganzen Breite der Frontlinie, ebenso durch Panzerhaubitzen mit 40 km Reichweite. Die gesamte Ökologie wird in dem betroffenen Bereich zerstört (es lässt sich kein Getreide mehr anbauen). Nicht nur durch die verbleibenden Minen ist der Bereich vollkommen zerstört, sondern ebenfalls durch die Panzer und scharfe Munition.

Das gilt auch für die ehemaligen, seit 30 Jahren nicht mehr benutzten Truppenübungsplätze, z.B. in Brandenburg, auf denen noch unzählige Munition liegt. In dem Bericht des französischen Ministère des Armeés, Chemins de Mémoire, «Les séquelles environnementales» („Spätfolgen für die Umwelt") steht zu den ökologischen Folgen des 1. Weltkriegs:

> „Es wurde erst vor wenigen Jahren begonnen, die Auswirkungen des Krieges von 14–18 auf die Umwelt zu untersuchen. Die laufenden Forschungen zeigen eines jedoch immer wieder: die Folgen reichen über die verwüsteten ehemaligen Gebiete hinaus und werden noch lange andauern. Dieser Artikel versucht, den langen Weg der Bewusstwerdung der ökologischen Folgen des Ersten Weltkriegs nachzuzeichnen."
> (Ministère des Armées, Chemins de Mémoire).

Die Frage, was mit dem Klima bei diesen Umweltschäden geschieht, können wir nicht beantworten, aber es zeigt, dass dazu noch großer Forschungsbedarf besteht. Wie groß sind TNT-Äquivalente hinsichtlich ihrer Sprengkraft? Was bewirken eine Million Artilleriegeschosse des NATO-Standardkalibers 155 Millimeter, die die EU der Ukraine zugesagt haben (s. z.B. Wetzel, 2023). Was bewirkt Streumunition, also Bomben/Granaten, die mit Kugeln bestickt sind und deren Einsatz zwar seit 2010 völkerrechtlich verboten ist, die aber dennoch eingesetzt werden.

Bezüglich des CO_2-Ausstoßes in die Atmosphäre stellt sich weiter die Frage, wie groß der Treibstoffbedarf ist, wenn ein Panzer oder eine Panzerhaubitze z.B. 1 km weit fährt. Dabei werden große Massen bewegt!

4. Rüstungsproduktion und Entropieerzeugung

Die weltweiten Rüstungsausgaben für das Militär betrugen im Jahr 2022 ca. 2,2 Billionen US-Dollar; davon machten die US-amerikanischen Ausgaben einen Anteil von rund 39 % aus (Statista 2023). Im Einzelnen entfielen davon auf die 3 Länder mit den weltweit höchsten Militärausgeben (in US-Dollar): USA 877 Milliarden, China. 292 Milliarden und Russland 86,4 Milliarden. Deutschland steht an 7. Stelle mit 55,8 Milliarden US-Dollar, wobei das Sondervermögen von 100 Milliarden Euro noch nicht berücksichtigt ist und vor kurzem weitere 2 Milliarden Euro beschlossen wurden.

Das sind alles Ausgaben für derzeitige und weitere Kriege! Sie werden insbesondere für die zukünftigen Kriege (Massenvernichtung) benötigt, d.h. man geht davon aus, dass man sie braucht. Wir erzeugen also Produkte, die das einzige Ziel haben, bereits bestehende Strukturen zu zerstören, wobei sie selbst zerstört werden. Die gesamte hochwertige Energie,

die zu ihrer Erzeugung gebraucht wird, wird vernichtet und soll vernichten. **Damit verbunden ist eine ungeheure Entropie-Erzeugung**.

Der Gebrauchswert für die menschliche Existenz ist dabei gleich Null, da die Produkte nur für die Vernichtung hergestellt werden. Auch wenn die Rüstungsprodukte verrosten und zu Müll werden, ist das eine ungeheure Entropieerzeugung. Es werden Produkte erzeugt, die man zu Nichts gebrauchen kann, was zum Leben gehört. Sie sind weder sinnvoll für die Umwelt noch für die Ökologie noch für das Klima. Es sind Produkte, die in gar keinem Fall zur Erhaltung der Menschheit, der Tiere oder des Klimas beitragen. Sie dienen nur der Vernichtung, der Erzeugung von Entropie, der Vernichtung von Gebrauchswerten und der Zerstörung anderer Strukturen.

Nicht nur das Bauen der Waffensysteme erzeugt Entropie, sondern auch deren Zweck und Wirkung, Strukturen zu vernichten, ist mit einer großen Entropieproduktion verbunden. Durch die Zerstörung findet eine ungeheure Umwandlung in minderwertige Wärmeenergie und extrem viel Staub statt.

Im Jahr 2023 wurde in der Bundesrepublik Deutschland mit Vehemenz die Lieferung von Leopard 2 Panzern und Panzerhaubitzen an die Ukraine diskutiert und befürwortet. Es scheint uns deshalb angebracht, hier einige Daten zu der dabei verwendeten Munition zusammenzustellen, um die Diskussion von einer sachlichen Grundlage aus beurteilen zu können.

Für den Leopard 2 wird eine Munition vom Kaliber 120 mm – DM 11 verwendet (Wikipedia, „Leopard 2“, 2025; Kotsch, 2024). Ihr Gewicht beträgt 19 kg (Mündungsgeschwindigkeit 1100 m/s, Reichweite bis 5 km, Penetrator Geschoß, Preis 9000 €/Stück.). Die Sprengkraft wird mit 1 bis 5 kg TNT angenommen. Die Bundeswehr hat für 1,3 Milliarden Euro Artilleriegeschosse bei Rheinmetall für die Ukraine bestellt (Tagesspiegel 18.07.2023). Das entspricht ca. 300 Kilotonnen TNT.

Für die Panzerhaubitze 2000 wird eine Munition vom Kaliber 155 mm mit einer Reichweite von 30–40 km verwendet (Wikipedia, „Panzerhaubitze 2000“, 2025; Wikipedia, „M107 (Geschoss)“, 2025; Wikipedia, „DM 121 (Artilleriegeschoss)“, 2025). Ihre Sprengkraft beträgt 6 bis 10 kg TNT bzw. äquivalenter Sprengstoff. Die Explosion der Granate überlebt im Umkreis von 50 m niemand mehr.

Zur leichteren Einordnung stellen wir hier die Werte für allgemein bekannte Sprengkörper bzw. vulkanische Eruptionen zusammen, wie sie in Wikipedia nachzulesen sind: (Wikipedia, „TNT-Äquivalent“, 2023):

- **Feuerwerk:**
  Das TNT-Äquivalent von frei erhältlichen Feuerwerkskörpern liegt unter einem Gramm.
- **Konventionelle Waffen:**
  Die stärkste konventionelle Explosivwaffe der US-Armee, GBU-43/B Massive Ordnance Air Blast, erreicht 11 Tonnen TNT-Äquivalent Sprengkraft bei einem Eigengewicht von etwa 9,5 Tonnen. Die Summe aller (konventionellen) Bomben, die im Zweiten Weltkrieg auf Städte abgeworfen wurden, erreicht geschätzte 2 Megatonnen = 2 Millionen Tonnen TNT-Äquivalent.
- **Kernwaffen:**
  Die Atombombe, die von den Vereinigten Staaten 1945 über Hiroshima abgeworfen wurde, hatte eine Sprengkraft von etwa 13 Kilotonnen TNT. Im Jahr 1961 wurde von der UdSSR die größte jemals getestete Wasserstoffbombe mit etwa 50 Megatonnen TNT-Äquivalent gezündet (Zar-Bombe).

– **Vulkane:**
Der Ausbruch von *Krakatau* im Jahr 1883 setzte je nach Quelle 130 MT oder 200 bis 2000 MT – Megatonnen (= 0,2 bis 2 GT – Gigatonnen) TNT-Äquivalent frei. Die *Tambora*-Eruption von 1815 ist mit 30 GT TNT-Äquivalent die größte in geschichtlicher Zeit beobachtete explosive Eruption. Energiefreisetzung von der größten effusiven Eruption in geschichtlicher Zeit, nämlich dem Ausbruch der *Laki-Spalte* auf Island in den Jahren 1783–1784 mit umgerechnet rund 120 GT TNT Äquivalent.

Diese Zusammenstellung macht die unfassbare Feststellung von W. Ebeling und R. Feistel nachvollziehbar (Ebeling / Feistel 2017):

> „Nachweisbar können die Bombenkriege der letzten 20 Jahre als Klimafaktoren nicht vernachlässigt werden. Moderne nichtnukleare Bomben haben eine Sprengkraft von 1 – 50 t TNT. Im Irakkrieg, der die USA nach Stiglitz (2010) ca. 3 Billionen Dollar gekostet hat, wurden geschätzt ca. 30.000 t Bomben und andere Sprengkörper eingesetzt. Da es sich um moderne Hightech-Sprengstoffe handelt, entspricht das einer Sprengkraft von weit mehr als 30.000 t TNT (30 Kilotonnen TNT; d. Autoren).
>
> Nimmt man konservativ geschätzt an, dass 1 t TNT einen Würfel 10·10·10 Meter zerstört, d.h. etwa 1000 Kubikmeter Gebäude von der Größe eines Einfamilienhauses, kommen wir auf über 10 Millionen Kubikmeter Material, das im Irakkrieg in die Luft gesprengt wurde und kommen in die Größenordnung des Ausstoßes starker Vulkane.“

Wie die Erdgeschichte zeigt, ist nicht der CO_2-Gehalt der Erdatmosphäre das primäre Problem (Ullmann / Bülow 2023), sondern die zu starke Entwertung der verfügbaren Energien, oder mit anderen Worten, die ineffiziente Nutzung des Stroms von Strahlungsenergie von der Sonne zur Erde und die zu starke Ausbeutung der in der Vergangenheit der Erde angelegten Vorräte (Ebeling et al. 2023).

Die Menge an Energie kann wegen des Erhaltungssatzes Thermodynamik nicht verloren gehen, wohl aber ihr Wert, der von der Physik über die Entropie des Systems bestimmt wird. Die unnötige oder ineffiziente Entwertung von Energie muss heutzutage, wo das Klima auf der Erde auf der Kippe steht, zu den Umweltsünden gerechnet werden.

5. Entropie – in Maß für Verwandlungen

Wir haben im Verlauf dieses Artikels schon häufig den Begriff der Entropie verwendet. Da dieser Begriff im Gegensatz zum Begriff der Energie jedoch in der öffentlichen Diskussion fast unbekannt ist, wollen wir ihn hier zum besseren Verständnis unserer Argumentation ein wenig verdeutlichen.

Der Entropiebegriff wurde von R. Clausius 1865 (Clausius 1865) eingeführt und in allgemeinverständlicher Form auf der 41. Versammlung der deutschen Naturforscher und Ärzte zu Frankfurt a. Main am 23. September 1867 vorgetragen (Clausius 1867) und krönte seine Pionierarbeiten zum zweiten Hauptsatz der Thermodynamik (Clausius 1850, 1854). Eine besondere Würdigung seiner wissenschaftlichen Tätigkeit findet sich bei Ebeling und Orphal (Ebeling / Orphal 1990).

In diesem Vortag erläutert Clausius in nicht mathematischer Form den Unterschied zwischen dem 1. und 2. Hauptsatz der Thermodynamik folgendermaßen:

> „Ich habe eine Grösse gebildet, welche in Bezug auf die Verwandelungen das Entsprechende darstellt, wie die Energie in Bezug auf Wärme und Werk (I. Hauptsatz, Satz von der Erhaltung der Energie, d. Autoren), nämlich die Summe

aller Verwandelungen welche stattfinden mussten, um einen Körper oder einen Complex von Körpern in seinen gegenwärtigen Zustand zu bringen (II. Hauptsatz, d. Autoren). Diese Grösse habe ich die *Entropie* genannt."

5.1. Disgregation und Entropie

Für unsere weiteren Betrachtungen ist es sehr interessant, wie Clausius die Wirkung der Wärme auf einen Körper beschreibt. Die Wirkung der Wärme bestehe darin, den zwischen den Molekülen oder Atomen bestehenden Zusammenhang zu lockern oder vollständig zu lösen und solche Moleküle, die schon in keinem Zusammenhang mehr stehen, noch möglichst weit voneinander zu entfernen.

„Um dieses kurz ausdrücken zu können, habe ich eine Grösse eingeführt, welche angiebt, wie weit bei einem Körper diese von der Wärme angestrebte Trennung und Entfernung seiner kleinsten Bestandtheile schon vollzogen ist, und welche ich die *Disgregation* genannt habe. Die Disgregation eines Körpers ist also unter den drei Aggregatzuständen im festen Zustande am kleinsten, im flüssigen grösser und im luftförmigen am grössten. … Somit *findet bei der Disgregationsvermehrung eine Verwandelung von Wärme in Werk* (z.B. Arbeit, d. Autoren) *statt*." (Clausius 1867, Seite 4)

„Umgekehrt muss, um die Disgregation zu vermindern, Werk verbraucht werden., … Bei diesem Processe wird Wärme erzeugt, und man erhält daher das Resultat, *dass bei der Disgregationsverminderung sich Werk in Wärme verwandelt*." (Clausius 1867, Seite 5).

So entsteht beispielsweise bei der Kondensation von Wasserdampf zu Wassertröpfchen, also einer Verminderung der Disgregation, in der Atmosphäre Wärme, was dazu führt, dass die sich dabei bildenden Wolken aufsteigen (Kumuluswolken bilden sich). Führt man nun ein und denselben Disgregationsvorgang, z.B. der Ausdehnung eines Gases auf das doppelte Volumen bei verschiedenen Temperaturen durch, dann muss man die dafür jeweils benötigten Wärmemengen Q durch die entsprechenden absoluten Temperaturen T teilen, da es sich ja in beiden Fällen um den gleichen Disgregationsgrad handelt. Dieser Quotient wird nach Clausius *Entropie* genannt und mit dem Symbol S bezeichnet:

$$S = \frac{Q}{T} = \frac{\text{Für die Verwandlung benötigte Energie}}{\text{Temperatur, bei der die Verwandlung stattfindet}}.$$

5.2. I. und II. Hauptsatz der Thermodynamik für reversible (umkehrbare) Prozesse

Die beiden Hauptsätze der Thermodynamik für umkehrbare, also reversible Prozesse formuliert R. Clausius wie folgt (Clausius, 1867, Seite. 11):

„*Die algebraische Summe von Wärme- und Werkerzeugung ist in jedem Processe gleich Null.*"
(I. Hauptsatz: Äquivalenz von Wärme und Werk)

„*Die algebraische Summe der Verwandelungen ist* (in jedem Prozess, d. Autoren) *gleich Null.*"
(II. Hauptsatz: Satz von der Äquivalenz der Verwandlungen)

Wir wollen dies an dem – einem jeden bekannten – Beispiel der Fahrradluftpumpe verdeutlichen: Saugen wir erst einmal Luft ein, indem wir den Kolben genügend weit herausziehen, und verschließen dann mit dem Daumen den Lufteingang. Drücken wir nun den Kolben, so dass die Luft zusammengepresst wird (*Verwandlung*), dann müssen wir dazu Kraft aufwenden; denn wir verringern das Volumen vom größeren Ausgangsvolumen V_A auf das kleinere Endvolumen V_E und damit die Entropie des Systems; denn wir haben dadurch

seine Disgregation vermindert. Unter der idealisierenden Annahme, dass die Luft ein „Ideales Gas“ sei, und wir den Vorgang bei konstanter Temperatur durchführen, gilt für die Verringerung der Entropie $\Delta S_{V_A \to V_E}$, dass sie negativ ist, da $V_E < V_A$:

$$\Delta S_{V_A \to V_E} = nR \ln \frac{V_E}{V_A} < 0 \,.$$

Die dabei von uns aufgewendete Kraft ist einzig durch die Verringerung der Entropie bedingt. Wir können die Entropie gewissermaßen haptisch „fühlen“.

Lassen wir nun wieder den Kolben los, dann dehnt sich das System sofort wieder von ganz allein von V_E auf das ursprüngliche Ausgangsvolumen V_A aus, und die Entropie des Systems wächst wieder um den Betrag an, um den sie zuvor durch uns verringert wurde. Es gilt:

$$\Delta S_{V_A \to V_E} = -\Delta S_{V_E \to V_A} \quad \text{bzw.} \quad \Delta S_{V_A \to V_E} + \Delta S_{V_E \to V_A} = 0.$$

Im Rahmen der eingangs gemachter Idealisierungen ist unser Beispiel ein reversibles System im Sinne der obigen Formulierung des 2. Hauptsatzes der Thermodynamik. (Lauth / Kowalczyk 2022).

5.3. Irreversible (nicht-umkehrbare) Prozesse

Umkehrbare, reversible Prozesse stellen jedoch nur einen idealisierten Spezial- bzw. Grenzfall dar. Nun gibt es aber Prozesse, die nicht umkehrbar sind. Clausius gibt dafür ein sehr illustratives Beispiel:

> „Denken wir uns ein Gefäss, in welchem das Gas enthalten ist, und nehmen an, dieses Gefäss werde plötzlich mit einem leeren Gefässe in Verbindung gesetzt, so wird ein Theil des Gases in das leere Gefäss überströmen, bis der Druck in beiden Gefässen gleich ist. Dann hat das Gas sich ausgedehnt, ohne irgendeine eine äussere Kraft zu überwinden. Man kann aber nicht das Gas wieder in sein früheres Volumen zurückbringen, ohne eine äussere Kraft anzuwenden. Diese Art der Ausdehnung hat also in nicht umkehrbarer Weise stattgefunden.“ (Clausius 1867, Seite 13)

Dieser Versuch ist als das Experiment der Ausdehnung von Gasen ins Vakuum von Joseph Louis Gay-Lussac (1778 – 1850) bekannt, (Brdička, 1963, S. 170), der es in den Jahren 1807 bis 1809 sowohl mit nahezu idealen als auch mit realen Gasen durchführte, wobei ein Wasserbad als Reservoir diente. Bei diesem Versuch stellte er fest, dass das (nahezu ideale, d. Autoren) Gas bei freier Expansion keine Wärme aufnimmt oder abgibt. Er folgerte daraus, dass die *innere Energie* U des Gases weder von seinem Volumen noch von seinem Druck abhängt. (zweites Gay-Lussac‘sches Gesetz) (Brdička, 1963, S. 170-171). Bei realen Gasen konnte er (1807) jedoch eine Erwärmung im einströmenden Gas und eine Abkühlung im Behälter des ausströmenden Gases beobachten.

Die Berücksichtigung unumkehrbarer, irreversibler Prozesse führt zu einer verallgemeinerten Formulierung des II. Hauptsatzes der Thermodynamik, die in der Diktion von R. Clausius (Clausius 1867) sinngemäß lautet:

> „Die algebraische Summe der Verwandelungen ist in jedem Prozess größer/gleich Null.“

Dies ist von entscheidender Bedeutung, da alle realen Prozesse nicht-reversibel sind. Somit ist mit ihnen immer eine Entropieproduktion verbunden. Wir erläutern dies im

Folgenden beispielhaft an dem wohlbekannten Vorgang des Schmelzens von Eis bzw. dem Gefrieren von Wasser.

5.3.1. Schmelzen von Eis und Gefrieren von Wasser

Die Dichte $\rho = m/V$ von Eis ist geringer als die von Wasser bei einer Temperatur $T < 4°\ \mathrm{C}$. Wenn das Eis also schmilzt, nimmt es eine größere Dichte an. Das bedeutet, sein Volumen V wird kleiner, da es zu Wasser mit der Temperatur $T = 0°\ \mathrm{C}$ wird. Dennoch werden beim Schmelzvorgang die Zusammenhänge zwischen den Molekülen im Kristallgitter des Eises „gelockert". Dieser Vorgang geschieht bei gleichbleibender Schmelztemperatur $T_{schmelz} = 0°\ \mathrm{C}$.

Im Sinne von Clausius haben wir also eine „Verwandlung" des molekularen Zusammenhangs der Moleküle zu betrachten, die bei konstanter Temperatur abläuft. Die Volumenänderung dV ist negativ, aber so gering, dass hierbei praktisch keine Volumenarbeit,

$$Volumenarbeit = Druck \cdot Volumenänderung = pdV \cong 0,$$

vom bzw. am System geleistet wird.

Also wird die gesamte, in Form von Wärme Q, zugeführte Energie dazu verwendet, den kristallinen Zusammenhang zu zerstören (Disgregation) – das Eis schmilzt. Wir betonen noch einmal: es wird praktisch keine Volumenarbeit dabei geleistet und auch die Temperatur ändert sich dabei nicht; denn das Eis wird beim Schmelzen nicht wärmer!

Beziehen wir nun diese für den Schmelzvorgang notwendige Energiezufuhr Q auf die Temperatur, bei der diese Zerstörung der kristallinen Struktur stattfindet, dann erhalten wir gemäß Claudius die *Entropie* $S = Q/T_{schmelz}$ (Schmelzentropie), die bei diesem Vorgang erzeugt wird als Maß für die Verwandlung der Struktur, also der Zerstörung der Kristallstruktur. Der neue Zustand, das flüssige Wasser, hat durch die Verwandlung des Eises in eine Flüssigkeit bei $T = 0\ °\mathrm{C}$ andere physikalische und chemische Eigenschaften als das feste Eis gewonnen. Es kann nun z.B. andere Stoffe in sich auflösen, was das feste Eis nicht kann.

Rückgängig kann man die Verwandlung nur machen, wenn man dem System, in diesem Fall dem Wasser, die Entropie wieder entzieht, indem man es kühlt, wozu aber ein ordentlicher Energiebetrag notwendig ist. Das Wasser wird von allein nicht selbst wieder gefrieren und zu Eis werden. Dazu bedarf es eines Arbeitsaufwandes, der der Flüssigkeit die Schmelzwärme wieder entzieht, was einem Export der erzeugten Entropie entspricht. Die mit diesem Arbeitsaufwand verbundene Energie übersteigt die Schmelzwärme bei weitem. Der Schmelzvorgang ist also irreversibel. Wir haben also beim Schmelzvorgang – der Verwandlung/Zerstörung – der Kristallstruktur irreversibel Entropie erzeugt und dabei den Wert der für den Verwandlungsprozess notwendigen Energie in diesem Fall völlig vernichtet. Allgemein gesprochen ist also die Entropie ein Maß für die *Degradation* (Verminderung, Entwertung) der für einen Verwandlungsprozess eingesetzten Energie (s. Kap. 5.4).

Betrachten wir nun beispielhaft eine Abschätzung der der Energie- und Entropiebilanz beim Schmelzprozess des Eises und beim Gefriervorgang des Wassers. Die Schmelzwärme des Eises (Wikibooks, 2023) beträgt bei 0 °C 333,5 kJ/kg bzw. 0,093 kWh/kg (Umrechnungsfaktor: 1 kJ = 1/3600 kWh) und seine Schmelztemperatur 0 °C bzw. 273 K. Damit erhält man für den Schmelzvorgang von Eis nach Wasser eine Schmelzentropie von $S_{Eis \to Wasser} = 333{,}5/273 = 1{,}22\ \mathrm{kJ/(kg \cdot K)}$ bzw. $0{,}34 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{kWh/(kg \cdot K)}$. Andererseits wird bei reversibler Reaktionsumkehr, dem Gefrieren von Wasser zu Eis, die Entropie um den gleichen Wert vermindert, d.h. $S_{Wasser \to Eis} = -0{,}34 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{kWh/(kg \cdot K)}$.

Nun muss aber die dazu notwendige Energie zum Schmelzen von außen, z.B. auf einem modernen Elektroherd mit Ceranplatte mit einem Wirkungsgrad von 60-80 % dem System hinzugeführt werden, wodurch sich die Entropie um ca. ein Drittel erhöht, $S_{Umgebung,schmelz} = 0{,}113 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{kWh/(kg \cdot K)}$. Diese Entropiezunahme wird aber an die Umgebung bzw. die dabei verwendeten Geräte und nicht an das geschmolzene Eis abgegeben.

Betrachten wir nun den umgekehrten Vorgang. Wir wollen dazu die soeben berechnete, im Wasser steckende Entropie aus dem Wasser mit der Temperatur von 0 °C wieder entfernen, damit es wieder zu Eis wird. Wie oben bereits erwähnt, benötigen wir dazu Energie bzw. wir müssen Arbeit verrichten. Wir verwenden hierfür eine moderne Küchen-Eismaschine, die mit einem Kompressor mit 130 W oder mehr betrieben wird. Die für den kühlenden Betrieb des Kompressors notwendige Energie, um aus 1 l Wasser von 0° C durch Gefrieren 1 l Eis zu erzeugen, muss durch elektrischen Strom bereitgestellt werden. Nach Prof. Turtur (Turtur 2025) von der Ostfalia Hochschule für Angewandte Wissenschaften kommt man beim Kompressor-Kühlschrank auf einen Wirkungsgrad von 15 % bis 18 %; d.h. nur etwa 1/6 der eingesetzten Energie führt zur Verminderung der Entropie beim Gefriervorgang, während 5/6, also der 5-fache Wert der Entropieerniedrigung beim Gefrieren an die Umgebung abgegeben wird. Die an die Umgebung abgegebene Entropie beträgt somit also ungefähr $S_{Umgebung,gefrier} = 5 \cdot 0{,}34 \cdot 10^{-3} = 1{,}7 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{kWh/(kg \cdot K)}$. Praktisch wurde der weitaus größte Teil elektrischer Energie, die wir für den Gefriervorgang verwendeten, in minderwertige Energie verwandelt, also nahezu vollständig entwertet, indem wir die Umgebung schön erwärmt haben.

Vergleichen wir nun das Schmelzen des Eises mit dem Gefrieren von Wasser bei jeweils $T = 0\ °\mathrm{C}$ hinsichtlich der für sie notwendigen Energie, dann zeigt sich, dass sehr viel mehr Energie für das Gefrieren aufgewendet werden muss als für das Schmelzen. In der Gesamtbilanz wird bei diesem irreversiblen Prozess Schmelzen/Gefrieren an die Umgebung eine Entropie von $S_{Umgebung,schmelz} + S_{Umgebung,gefrier} = (0{,}113 + 1{,}7) \cdot 10^{-3} = 1{,}8 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{kWh/(kg \cdot K)}$ abgegeben – und dies bei nur einmaliger praktischer Anwendung, um 1 kg Eis zu schmelzen und 1 l Wasser wieder zu gefrieren.

Aber natürlich muss die gesamte elektrische Energie – sowohl beim Schmelz- wie auch beim Gefriervorgang – erst einmal durch ein Elektrizitätswerk erzeugt und uns bereitgestellt werden. Das kann z.B. durch ein modernes Gaskraftwerk geschehen. Aber auch das hat nur einen Wirkungsgrad von 50%, was durchaus beachtlich ist. Um also die notwendige Gesamtmenge an elektrischer Energie uns bereitzustellen, muss also das Doppelte an Energie erzeugt werden, indem entsprechend viel Gas verbrannt wird. Das ist selbstverständlich ebenso mit einer großen Entropieproduktion verbunden.

5.4. Degradation (Entwertung) der Energie durch Entropieerzeugung

Bereits die Definition eines Systems bedingt, dass es etwas gibt, was nicht zum System gehört. Dieses nicht zum System Gehörende, aber mit ihm Verbundene – gewöhnlich als Umgebung bezeichnet –, wird in der Thermodynamik als *Reservoir* benannt. Clausius beschreibt in seinem o.g. Experiment ein *ideales Gas* in einem *isolierten* System, das keinen Wärmeaustausch mit seinem Reservoir hat. Eine Veränderung des Volumens dieses Systems kann die Gesamtenergie des Systems im Sinne des I. Hauptsatzes nicht verändern, da es keinen Energieaustausch mit einem Reservoir gibt und da es in einem „idealen Gas“ definitionsgemäß keinen Wechselwirkungen zwischen den Teilchen des Gases gibt. Wohl aber nimmt hierbei die Entropie im System zu, „denn die Änderung der Entropie hängt

nur vom Anfangs- und Endzustand des Systems, aber in keiner Weise von der Art der Durchführung des Vorganges ab.“ (Brdička, 1963, S.330)

Wenn aber die im System enthaltene Energie, die „*innere Energie*“ U sich während der Expansion des Gases in das Vakuum nicht ändert, $\Delta U = 0$, aber die Energie $T\Delta S$ bei der Disgregation des Gases in Form einer Entropiezunahme $\Delta S > 0$ erzeugt wird, dann muß diese Energie in gleicher Größe aus der inneren Energie entnommen werden.

So wie die Entropie als Maß der Disgregation eine Zustandsgröße des Systems ist, die nur vom Zustand und nicht vom Weg, wie dieser erreicht wurde, abhängig ist, gibt es nach H. v. Helmholtz (Helmholtz, 1882) noch eine weitere Zustandsgröße, die „*freie Energie*“ F, die die Fähigkeit des Systems beschreibt, bei spontaner Verwandlung aus sich heraus Arbeit zu leisten, z.B. aus der verfügbaren Inneren Energie U. Die Zunahme der *freien Energie* eines Systems bei jedem beliebigen isothermen Vorgang hängt mit der Zunahme der *inneren Energie* und der *Entropie* folgendermaßen zusammen (Brdička, 1963, S. 335):

$$\Delta F = \Delta U - T\Delta S\ .$$

Mit anderen Worten: Die bei der Verwandlung des Systems als Arbeit nutzbare Energie ist die freie Energie, nämlich die Differenz der zur Verfügung stehenden inneren Energie abzüglich der mit der erzeugten Entropie verbundenen Energie. Im Fall der freien Expansion des idealen Gases bleibt, wie bereits erwähnt, die innere Energie unverändert $\Delta U = 0$, so dass die für eventuelle Arbeit verfügbare freie Energie gerade dem Negativen der mit der Entropieerzeugung verbundenen Energie $T\Delta S$ ist:

$$\Delta F = -T\Delta S = -RT\ln\frac{V_2}{V_1}.$$

Das bedeutet aber nichts anderes, als dass der Gesamtbetrag der freien Energie F um den Betrag $T\Delta S$ durch die Entropieproduktion vermindert wurde. Anders ausgedrückt, bei einer Verwandlung vermindert die Zunahme der Entropie die Fähigkeit des Systems Arbeit zu leisten; sie *degradiert* die zuvor vorhandene freie Energie F.

Zum leichteren Verständnis des Begriffes der *Degradation* mag es angebracht sein, sich statt der Volumenzunahme die Druckverhältnisse bei dieser Expansion des idealen Gases ins Vakuum, also beim Übergang vom Anfangsdruck p_{Anfang} zum Enddruck p_{Ende}, wobei $p_{Anfang} > p_{Ende}$, anzuschauen. Danach nimmt die Fähigkeit des Systems zu weiteren spontanen Veränderungen ab, weil nach dem Druckausgleich nicht mehr genügend hoher Druck im System vorhanden ist (Brdička, 1963, S. 329-330):

$$\Delta F = -T\Delta S = -RT\ln\frac{p_{Anfang}}{p_{Ende}} = -RT\ln\frac{p_1}{p_2}.$$

6. Disgregation und Entropie beim Zerteilen eines Festkörpers

Zwar beschreibt R. Clausius die Disgregation als die Wirkung von Wärme auf einen Körper, aber er sagt auch, was er unter der Disgregation versteht, nämlich die Zertrennung einerseits und Entfernung seiner kleinsten Bestandteile voneinander andererseits. Das bezieht er auch auf feste Phasen (s.o.).

Nun gibt es ein schönes, allseits bekanntes Beispiel für die Zertrennung eines Kristalls durch den Einfluss von Wärme: Nimmt man große Zuckerkristalle – auch als Kluntjes bekannt – und übergießt sie mit heißem Tee, dann zerspringen die Kristalle entlang ihrer kristallinen Netzebenen mit leichtem, fraktalem Knistern (Schwietering / Plath 1991). Die kristalline Struktur wird zerstört, wobei das Muster der Gesamtheit der Bruchstellen fraktal ist. (Louis / Guinea / Flores 1986).

Solche fraktalen Zerstörungen von Kristallen sind aber nicht nur durch Wärme erzeugbar, sondern können auch bei Anwendung von äußerem Druck wie z.B. beim Mörsern oder durch chemische Prozesse im Innern der Kristalle erzeugt werden. Ein Beispiel hierfür sind Ausblühungen von Schwefel in Zeolithen, die durch die katalytische Oxidation von Schwefelwasserstoff im Zeolithen entstehen (Jaeger et al. 1982). In all diesen Fällen bleibt das Volumen des zerstörten Materials erhalten und selbst die Tracht – bzw. die Gestalt – des Kristalls ändert sich dabei nicht – er zerfällt bzw. zerbröselt in kleine Kristalle. Im Fall der Zerstörung der Kristalle durch Druckeinwirkung (wahrscheinlich auch bei den chemischen Prozessen in seinem Innern) bleibt auch die Temperatur weitgehend konstant.

a) b)

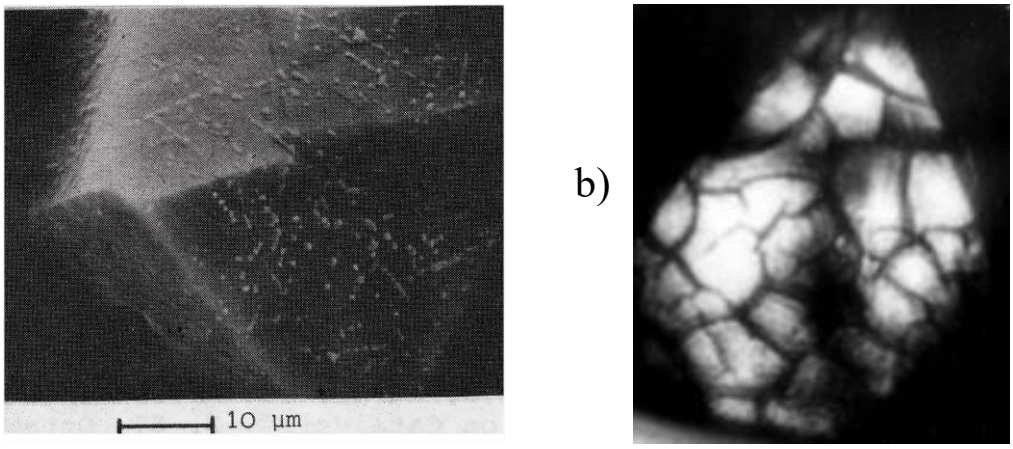


Abb. 2 Rasterelektronenmikroskopische (REM) Aufnahme eines dehydratisierten NaX Zeolith-Einkristalls (Kantenlänge ca. 60 µm), nachdem die Oxidation von H_2S zu Schwefel und Wasser in ihm stattgefunden hat. a) Ausblühungen von Schwefel; b) Disgregation des Zeolithen.

Wir gehen deshalb ganz allgemein davon aus, dass die Zerstörung/Zertrennung eines festen Körpers ganz im Sinne von Clausius als Trennung des Körpers in seine kleinsten Bestandteile bei Erhaltung seiner Festkörpereigenschaften zu verstehen ist. Die dazu notwendige Energie kann z.B. in Form von Wärme oder Druck bereitgestellt werden. In der Diktion von R. Clausius handelt es sich auch hierbei um eine Disgregation.

Aber wo bleibt die für die Zerteilung eines festen Körpers hinzugefügte Energie? Denn anders als beim Schmelzvorgang, entsteht hier ja keine Flüssigkeit. Sie kann ja gemäß dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik nicht verschwinden! Da der Energieerhaltungssatz gilt, muss die Energie in der durch die Zerteilung erzeugten neuen Oberfläche stecken, denn das Volumen der Summe aller neu erzeugten Teilchen bleibt gleich. Das Einzige, was sich vergrößert und die zur Zerkleinerung aufgewendete Energie aufnehmen kann, ist die dabei entstehende Oberfläche.

Wird die Zerkleinerung durch Mahl- oder Mörserprozesse wie in der Zementindustrie durchgeführt, kommt zusätzlich eine Entropieerzeugung durch Reibung zustande die wir hier aber nicht berücksichtigen.

Um dies zu verdeutlichen, nehmen wir zum Beispiel einen Würfel der Größe vom Volumen $V = 1\ \mathrm{cm}^3$. Er besitzt die Oberfläche von $O \equiv O_1 = 6\ \mathrm{cm}^2$. Durch die alle sechs Seiten halbierenden Schnitte erhalten wir 8 kleine Würfelchen, deren Gesamtvolumen wiederum $V = 8\left(\frac{1}{2}\ \mathrm{cm}\right)^3 = 1\ \mathrm{cm}^3$ ist. Aber die Oberfläche der entstandenen acht Würfelchen beträgt

$$O_2 = 8 \cdot 6\left(\frac{1}{2}\mathrm{cm}\right)^2 = 8 \cdot \frac{6}{4}\mathrm{cm}^2 = 12\ \mathrm{cm}^2$$

und hat sich dabei verdoppelt (s.).

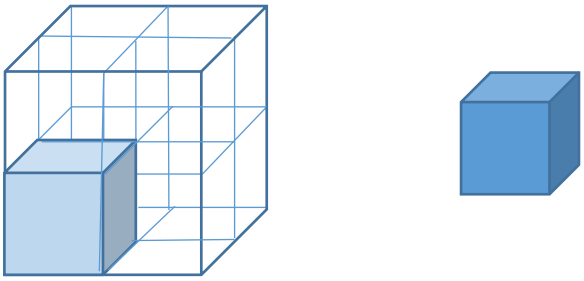


Abb. 3 Zerlegung eines Würfels mit der Kantenläge einer Längeneinheit ($1\ LE$) durch Schnitte, die seine Kanten bzw. Seiten halbieren, in acht Würfeln mit der Kantenlänge $\frac{1}{2}LE$.

Teilt man nun die Seitenlänge des Würfels nicht nur in 2 Teile, sondern in n Teile, dann vergrößert sich die Oberfläche um den Faktor n, während das Volumen unverändert gleichbleibt:

$$O_n = n^3 \cdot 6\left(\frac{1}{n}\ \mathrm{cm}\right)^2 = n^3 \cdot \frac{6}{n^2}\mathrm{cm}^2 = n \cdot 6\ \mathrm{cm}^2 = n \cdot O_1.$$

Würde man den Würfel auf die Teilchengröße von Feinstaub mit einem mittleren Partikel-Durchmesser von $1\ \mu\mathrm{m} = 10^{-4}\ \mathrm{cm}$ (mittlerer Wert der Feinstaub-Normen PM_{10}, und UFP, Umweltbundesamt 2025) oder Aerosolteilchen von z.B. $1\ \mathrm{nm} = 10^{-7}\ \mathrm{cm}$ herunterbrechen, dann würden sich die Oberflächen der dabei entstehenden Mikro- bzw. Nano-Würfel um das 10^4-fache bzw. 10^7-fache der Oberfläche des ursprünglichen Würfels vergrößern. Dies sind $O_{mikro} = 6 \cdot 10^4\ \mathrm{cm}^2 = 6\ \mathrm{m}^2$ bei den Mikrowürfeln und $O_{nano} = 6 \cdot 10^7\ \mathrm{cm}^2 = 6000\ \mathrm{m}^2$ bei den Nanowürfeln.

Wie aber kann man verstehen, dass sich die zum Zerkleinern aufgewandte Energie in die Oberflächenenergie der „Trümmerteile“ verwandelt? Unter der Oberflächenenergie $\gamma = E/A$ versteht man die Energie E, die zum Erzeugen der jeweiligen Oberfläche je Flächeneinheit A aufgewendet werden muss (Wikipedia, „Oberflächenenergie“, 2025). Sie ist ein Maß für die Energie, die zum Aufbrechen der zwischenmolekularen Bindungen aufgewendet werden muss, um die neue Oberfläche entstehen zu lassen, und ist somit stets größer Null. Die Oberflächenenergie wird im Allgemeinen in den Einheiten $[\mathrm{dyn/cm}] = [10^{-3}\ \mathrm{N/m}] = [\mathrm{mN/m}]$ angegeben. Glas bzw. Keramik und Porzellan haben Oberflächenenergien von ca. $200 - 500\ [\mathrm{dyn/cm}]$, Zement liegt bei etwa $70\ [\mathrm{dyn/cm}]$ (3M Science.Applied to Life™ 2025). Zement wird in der folgenden Betrachtung als Beispiel gewählt, da es sowohl in der Bauindustrie als auch bei der Zerstörung von Gebäuden eine besondere Rolle spielt.

Wie groß ist aber die Entropiezunahme bei der Zerteilung eines festen Körpers? Man erhält diese Entropie, indem man die Oberflächenenergie γ mit der Fläche A, d.h. der Oberfläche der bei der Zerlegung entstehenden Teilchen, multipliziert und durch die Temperatur T dividiert, bei der die Oberflächenerzeugung stattfindet:

$$\Delta S_{Zerteilung} = \gamma \frac{A}{T} = \gamma \frac{O_{Teilchen}}{T_{Zerteilung}}.$$

Aus $1\ \mathrm{cm}^3$ Zement ergibt sich somit bei der Zerkleinerung in 10^7 Nanowürfelchen mit einer Gesamtoberfläche von $6000\ \mathrm{m}^2$ bei Raumtemperatur eine Entropieerhöhung von:

$$\Delta S_{nano} = 70 \cdot 10^{-3}[\mathrm{N/m}] \cdot 6 \cdot 10^{3}[\mathrm{m}^2]/293\,[\mathrm{K}] = 1{,}433\,[\mathrm{Nm/K}]$$
$$= 3{,}98 \cdot 10^{-7}[\mathrm{kWh/K}]$$

(Umrechnungsfaktor: $1[\mathrm{Nm}] = 1[\mathrm{J}]$=$2{,}778 \cdot 10^{-7}[\mathrm{kWh}]$). Analog erhält man bei Glas, Keramik oder Porzellan Entropiezunahmen von $(1{,}1 - 2{,}8) \cdot 10^{-6}[\mathrm{kWh/K}]$.

Ähnlich wie auch das geschmolzene Eis, das flüssige Wasser, andere, neue Eigenschaften aufweist als das feste Eis, ergeben sich bei der Zerkleinerung von Festkörpern neuartige Verhältnisse, die sich besonders in ihren chemischen Eigenschaften äußern. So haben Mikroteilchen eine große Affinität chemisch zu reagieren. Wenn man einen Feststoff nur weit genug zerkleinert, wird er explosiv (z.B. Zink, Zn, oder Zinn, Sn); d.h. in den Größenbereichen von Mikrometern kann der so zerkleinerte Stoff zu explosionsartigen Reaktionen mit dem Sauerstoff der umgebenden Luft führen. „Bei Vergrößerung der Zinkoberfläche wird die Einwirkung von Wasser merklicher; so zersetzt Zinkstaub Wasser bereits bei gewöhnlicher Temperatur“ (Hollemann / Wiberg 1964, S. 486). Selbst Eisen kann als sogenanntes „*pyrophores Eisen*“ im Kontakt mit Luftsauerstoff in Brand geraten “ (Hollemann / Wiberg 1964, S. 398, 549).

Die industrielle Katalyse, aber auch die moderne Abgaskatalyse, beruht weitgehend wegen ihrer besonders großen Oberflächen auf der Verwendung von Mikro- oder noch besser von Nanometer kleinen Katalysatorkörnern auf sonst inerten, mineralischen Trägern.

Die Problematik der Vergrößerung der Oberflächenenergie und der zunehmenden Reaktivität bei Vergrößerung der Oberfläche ist auch interessant hinsichtlich des Plastikmülls. Eine Plastiktüte hat eine ganz kleine Oberfläche und ist nicht reaktiv. Wenn man die Plastiktüte aber in kleine Plastikblättchen zerlegt, erhält man bei gleichbleibender Gesamtoberfläche einen sehr großen, chemisch reaktiven Randbereich der entstehenden Nanoplastikteilchen.

Geht man z.B. von einem Plastikteilchen mit der (quadratischen) Fläche $A = 1\mathrm{cm}^2$ aus, dann beträgt die Länge seines Randes $L \equiv L_1 = 4\ \mathrm{cm}$. Zerschneidet man diese Fläche, indem man gegenüberliegende Seiten halbiert, so erhält man bei gleichbleibender Fläche eine Verdopplung der Randlänge, $L_2 = 4 \cdot 4 \cdot 1/2\ \mathrm{cm} = 8\ \mathrm{cm}$. Teilt man allgemein die Seitenlänge der Fläche nicht nur in 2, sondern in n Teile, dann vergrößert sie sich um den Faktor n, während die Fläche weiterhin unverändert gleichbleibt:

$$L_n = n^2 \cdot 4 \cdot \frac{1}{n}\mathrm{cm} = n\ 4\ \mathrm{cm} = n\ L_1.$$

Das sind gewaltige Kantenlängen, die zu massenhaften und vielfältigen chemischen und biologischen Reaktionen führen.

Das gleiche Prinzip gilt bei der Frage der Warenproduktion und der Erzeugung von Müll, wobei sich die Teilchenzahl ebenfalls erhöht, insbesondere bei der Erzeugung von Mikro- und Nanoplastik. Durch das Entstehen von vielen Mikro- und Nanoplastik-Teilchen ergibt sich eine ungeheure Entropieerhöhung, z.B. im Meer. Dies ist quantitativ praktisch nicht fassbar, aber es ist nachvollziehbar, dass damit L*e*ben vernichtet und das Klima dadurch völlig verändert wird und große Umweltschäden durch Zerstörung der Umwelt entstehen.

6.1. Expansion der Feinstaubwolke – Disgregation durch Zerstäuben

Der Umweltschaden einer Explosion ist nicht nur die Zerstörung, beispielsweise eines Einfamilienhauses, sondern vor allem die Entropiezunahme durch Feinstaubteilchen. Diese Entropieerhöhung durch die Zunahme der Feinstaubteilchen in der Luft kann für die Zerstörung eines Gebäudes von $10 \cdot 10 \cdot 10\ \mathrm{m}^3$ durch einen Explosivstoff von $1\ \mathrm{t}$ TNT-Äquivalent wie nachfolgend ausgeführt abgeschätzt werden.

Angenommen, ein Gebäude mit einem Volumen von $10^3\mathrm{m}^3$ wird in 10^9 gleich große, Würfel-förmige Volumenanteile von z.B. jeweils $1\mathrm{cm}^3$ zerlegt. Das sind noch ganz schön große Steinchen; Aerosole wie der Saharastaub oder Seesalz haben eine Größe von 10 bis $100\ \mu\mathrm{m}$ bzw. $0{,}01\ \mathrm{mm}$ bis $0{,}1\ \mathrm{mm}$. Wenn man nun den Kubikzentimeter in solch kleine Teilchen zerlegt, was bei einer Explosion durchaus geschieht, dann würde jeder Kubikzentimeter in 10^9 bzw. 10^6 Teilchen zerstäubt werden. Und das ist nur ein Kubikzentimeter, der zerstäubt wurde! Natürlich wird nicht das ganze Haus so zerstäubt, aber im Bereich der Einschlagstelle der Granate wird dies für eine derartige Zerstäubung in großem Umfang möglich sein.

Wir haben weiter oben bereits die Entropie der Zerteilung, die Zerteilungsentropie einer kompakten Struktur, am Beispiel eines $1\ \mathrm{cm}$ großen Zementwürfels berechnet. Aber bei einem Abriss eines Gebäudes bzw. bei seiner Zerstörung durch eine Granate bleibt die Tracht bzw. Gestalt des Gebäudes auch nicht ansatzweise erhalten und es steigt gewöhnlich eine große Staubwolke dabei auf. Der dabei entstehende Staub verbreitet sich in der Umgebung. Das entspricht weitgehend dem oben geschilderten Gedanken-Experiment von R. Clausius der spontanen freien Expansion eines Gases ins Vakuum, nur handelt es sich hierbei nicht um ein Gas und auch nicht um eine freiwillige Expansion.

Es handelt sich aber auch um eine Vergrößerung der Disgregation, also der Verteilung von ehemaligen Teilen eines Festkörpers im Raum. So ist es naheliegend, diese Veränderung der Verteilung durch eine Änderung der zugeordneten Wahrscheinlichkeiten W_i vom Anfangszustand (1) zum Endzustand (2) zu beschreiben und ihr ganz im Sinne der statistischen Interpretation der Entropie von L. Boltzmann (Boltzmann, 1877; Planck, 1900; Brdička, 1963, S. 332-334) eine Entropie S bzw. Entropiedifferenz ΔS gemäß

$$S = k_\mathrm{B} \ln W \quad \text{bzw.} \quad \Delta \mathrm{S} = S_2 - S_1 = k_\mathrm{B} \ln \frac{W_2}{W_1}$$

zuzuordnen; $k_\mathrm{B} = 1{,}381 \cdot 10^{-23}\ [\mathrm{J/K}]$ ist die Bolzmann-Konstante, eine Naturkonstante, mit deren Hilfe unter anderem die thermische Energie eines Teilchens aus der Temperatur berechnet werden kann (Wikipedia, „Boltzmann-Konstante“, 2025). Da sich diese Formulierung der Entropie nur auf ein Molekül bzw. ein Teilchen bezieht, das sich wie in einem idealen Gas verhält, müssen S bzw. ΔS, wie wir zeigen werden, mit der Zahl N_P der entstehenden Teilchen multipliziert werden, wenn sie das Verhalten der Gesamtheit der durch die Zerteilung entstehenden Teilchen beschreiben sollen.

Gehen wir beispielsweise davon aus, dass der Festkörperwürfel mit dem Volumen von $1\ \mathrm{cm}^3$ in $N_P = 10^9$ Würfelchen mit der Kantenlänge von $10\ \mu\mathrm{m} = 10^{-3}\ \mathrm{cm} = 10^{-5}\ \mathrm{m}$ zerlegt wurde. Das entspräche gerade den größten Feinstaubpartikeln der Klasse PM_{10} nach dem PM-Standard (Particular Matter, World Health Organization 2021), für die gilt, dass ihr aerodynamischer Durchmesser $d = 10\ \mu\mathrm{m}$ ist. Zu Beginn der „Expansion“ bzw. der Verteilung durch die äußere Krafteinwirkung befindet sich also jeder dieser Feinstaubpartikel in diesem Ausgangsvolumen $V_1 = 1\ \mathrm{cm}^3$. Nehmen wir an, es stände ihm unmittelbar danach auf Grund der „Explosion“ z.B. ein Volumen $V_2 = 8 \cdot 10^3\ \mathrm{cm}^3$ (Kubus von $20\ \mathrm{m}$ Kantenlänge) zur Verfügung. Der neue Raum V_2 entspricht also dem $8 \cdot 10^9$-fachen des Ausgangsvolumens V_1, d.h. er besteht aus $N_V = V_2/V_1 = 8 \cdot 10^9$ Volumina von $1\ \mathrm{cm}^3$. Irgendwo in dieses ihm gerade eröffnete Volumen wird das Feinstaubpartikel durch die Explosion geschleudert. Das wäre z.B. typisch für Sprengungen von Gebäuden annähernd dieser Größe, wo man bei gewolltem Abriss bewusst die Sprengung so durchführt, dass die Staubentwicklung nicht wesentlich von der Größe des Gebäudes abweicht.

Die Wahrscheinlichkeit W_1 eines Partikels, sich im Augenblick seiner Entstehung durch die Explosion noch in dem ursprünglichen Raum $V_1 = 1\ \mathrm{cm}^3$ zu befinden, beträgt somit:

$$W_1 = \frac{V_1}{V_2} = \frac{1\ \mathrm{cm}^3}{8000\ \mathrm{m}^3} = \frac{10^{-6}\ \mathrm{m}^3}{8 \cdot 10^3\ \mathrm{m}^3} = \frac{1}{8 \cdot 10^9} = \frac{1}{N_V}.$$

Hingegen ist die Wahrscheinlichkeit des Feinstaubpartikels, sich danach irgendwo in dem neueröffneten Raum V_2 zu befinden, $W_2 = 1$.

Dies gilt jedoch nicht nur für ein einziges Feinstaubpartikel, sondern für alle $N_p = 10^9$ Teilchen, die bei der Zerteilung des ursprünglichen Festkörpers mit dem Volumen $V_1 = 1\ \mathrm{cm}^3$ entstanden sind. Die Wahrscheinlichkeiten für all diese Teilchen müssen also miteinander multipliziert werden, um die Wahrscheinlichkeiten des Anfangs- und Endzustands $W_{Anfang} = (W_1)^{N_P} = (1/V_1)^{N_p}$ bzw. $W_{Ende} = (W_2)^{N_P} = (1)^{N_p}$ zu berechnen. Somit ergibt sich für die bei der Verteilung des bereits zerstörten Festkörpers entstehenden Entropie der Ausdruck:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = k_\mathrm{B} \ln \frac{W_2}{W_1} = k_\mathrm{B} \ln \frac{(1)^{N_p}}{(1/V_1)^{N_p}} = k_\mathrm{B} \cdot N_P \ln N_V\ .$$

Für das hier gewählte Beispiel ergibt sich nach Umrechnung von J (Joule) auf kWh (s.o.):

$$\Delta S = 1{,}381 \cdot 10^{-23}[\mathrm{J/K}] \cdot 10^9 \cdot \ln(8 \cdot 10^9) = 31{,}49 \cdot 10^{-14}[\mathrm{J/K}]$$
$$= 8{,}748 \cdot 10^{-20}[\mathrm{kWh/K}].$$

Nun bezog sich unser Beispiel auf ein Ausgangsvolumen von nur $V_1 = 1\ \mathrm{cm}^3$ und einer Verteilung der Feinstaubpartikel auf jeweils $V_2 = 8 \cdot 10^3\ \mathrm{m}^3$, also der achtfachen Größe des Hauses von $10 \cdot 10 \cdot 10\ \mathrm{m}^3$. Das Haus bzw. der bereits erwähnte Zementblock mit einem Volumen von $10^3\ \mathrm{m}^3$, der durch eine Granate mit $1\ \mathrm{t}$ TNT vollständig zerstört wird, enthält aber nicht nur einen Würfel vom Volumen $V_1 = 1\ \mathrm{cm}^3$, der auf Feinstaubpartikel des PM_{10}-Standards (Partikeldurchmesser $\leq 10\ \mu\mathrm{m}$) pulverisiert wird, sondern 10^9 solcher Würfel ($10\ \mathrm{m} = 10^3\mathrm{cm}$). Werden sie alle zu Feinstaub pulverisiert, dann entstehen dabei insgesamt $N_p = 10^{18}$ Würfelchen der Größe von $10\ \mu m$. Das ist aber unrealistisch.

Viel eher wahrscheinlich scheint uns die Annahme zu sein, dass zumindest ein weiterer Kubikzentimeter Zement oder Kalk in noch wesentlich kleinere Partikel der Größe von 1 bis $10\ \mathrm{nm}$ (Nanometer) zu „*Ultrafeinstaub*“ (UFP ultra fine particle bis maximal $100\ \mathrm{nm} = 0{,}1\mu\mathrm{m}$) bzw. *Schwebstaub* zerkleinert wird. Sie bilden die kleinste Fraktion des Feinstaubes. An bestimmten Arbeitsplätzen machen sie bis zu 10 % der Staubmasse, aber 90 % der Partikelanzahl aus (Wikipedia, „Ultrafeinstaub“, 2025).

Nehmen wir der Einfachheit des Beispiels halber wieder $1\ \mathrm{cm}^3$ eines Festkörpers und zerlegen ihn in $10\ \mathrm{nm}$ große Ultrafeinpartikel ($10\ \mathrm{nm} = 10^{-6}\mathrm{cm} = 10^{-8}\mathrm{m}$). Dann erhalten wir $N_p = (10^6)^3 = 10^{18}$ ultrafeine Würfelchen. Da sich dieser Schwebstaub über viele Kilometer hin ausbreitet und auch in höhere Luftschichten gelangt, nehmen wir als unmittelbares Ausbreitungsvolumen V_2 des Schwebstaub nach der Zerstörung des Festkörpers eine Halbkugel vom Radius $r = 1\ \mathrm{km} = 10^3\mathrm{m}$ an, deren Volumen $V_{Halbkugel} = 2/3\,\pi r^3 = 2{,}0944 \cdot 10^9\mathrm{m}^3$ beträgt. Das ursprüngliche Volumen von $V_1 = 1\ \mathrm{cm}^3 = 10^{-6}\mathrm{m}^3$ ist im Ausbreitungsvolumen V_2 $V_2/V_1 = N_V$-mal enthalten, was einen Wert $N_V = 2{,}0944 \cdot 10^9\mathrm{m}^3/10^{-6}\mathrm{m}^3 = 2{,}0944 \cdot 10^{15}$ ergibt. Die hierbei entstehende Entropie beträgt somit:

$$\Delta S = k_\mathrm{B} \cdot N_P \ln N_V = 1{,}381 \cdot 10^{-23}[\mathrm{J/K}] \cdot 10^{18} \cdot \ln(2{,}0944 \cdot 10^{15})$$
$$= 48{,}719 \cdot 10^{-5}[\mathrm{J/K}].$$

Dies sind umgerechnet $1{,}3533 \cdot 10^{-10}$ kWh/K.

Die Entropie, die mit der Erzeugung und Verbreitung von Ultrafeinstaub verbunden ist, hat sich gegenüber der des Feinstaubs ($8{,}748 \cdot 10^{-20}$ kWh/K) um mehr als den Faktor 10^{10}, also das Milliardenfache, vergrößert, was vor allem durch die starke Vergrößerung der Teilchenzahl bedingt ist.

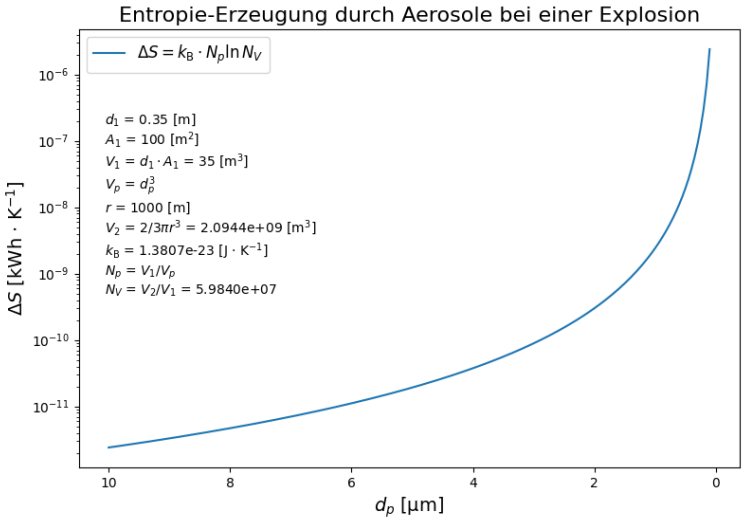


Abb. 4 Entropiezunahme bei abnehmenden Partikeldurchmesser d_P.

In Abb. 4 ist am Beispiel der vollständigen Zerstörung einer Hauswand bzw. eines Zementblocks von 35 cm Dicke und einer Fläche von $10 \cdot 10\ \mathrm{m}^2$ die Entropiezunahme in Abhängigkeit von der Anzahl N_P der Feinstaubteilchen, deren Partikeldurchmesser d_P von 10 µm bis 0,1 µm abnimmt (Feinstaubgrößenklassen PM_{10} und $\mathrm{PM}_{2,5}$) und die in eine Halbkugel vom Radius $r = 1$ km verteilt werden, dargestellt. Die Grafik veranschaulicht deutlich den exponentiellen Anstieg der Entropie bei abnehmender Größe der Feinstaubpartikel.

Selbst wenn diese Entropiewerte etwas zu hoch gegriffen sein mögen, so deuten sie doch auf einen großen Verlust von Kompaktheit, bei der Zerstörung von Gebäuden durch Explosionen hin.

7. Entropie der Explosion am Beispiel TNT

7.1. Physikalisch-chemische Dynamik der Zerstörung durch Explosivkräfte

Bei einer chemischen Reaktion spielt die Entropie für das Reaktionsgeschehen dann eine große Rolle, wenn die Anzahl der Moleküle sich dabei ändert. Solange sich bei einer chemischen Reaktion die Anzahl der Moleküle nicht ändert, ist auch die Entropieänderung in der Regel von untergeordneter Bedeutung (z.B. bedingt durch die Reaktionswärme).

Bei chemischen Reaktionen gilt für die Energieänderung im speziellen Fall der frei zur Verfügung stehenden Energie, der *Freien Enthalpie* ΔG, dass diese gleich der durch die chemische Reaktion zur Verfügung gestellten Energie, der Enthalpie ΔH, abzüglich der durch die Entropieerzeugung ΔS erfolgten Wärmemenge $T\Delta S$ ist:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S.$$

Wie im Abschnitt 2.1 bereits ausgeführt wurde, liefert 1 Mol TNT bei der Explosion 11 Mole Gas in Form von gasförmigem Wasser, Kohlendioxid und Stickstoff. Dazu müssen jedoch 5,25 Mole Sauerstoff zur Verfügung gestellt werden:

$$C_7H_5N_3O_6 + 5{,}25\ O_2 \rightarrow 2{,}5\ H_2O + 7\ CO_2 + 1{,}5\ N_2.$$

Die Gesamtänderung der Anzahl der Mole bei der Reaktion beträgt also 11- 6,25 = 4,75 Mole und trägt somit beträchtlich zur Entropieerzeugung bei.

Nun steht aber in der ersten Phase der Explosion innerhalb des Geschoßmantels nicht genügend Sauerstoff zur Verfügung, da TNT zu den homogenen CHNO-Explosivstoffen gehört, und nicht aus einem Gemisch von CH-Sprengstoff und Sauerstoffträger besteht. Die CHNO-Explosivstoffe können im Gegensatz zu den CH-Sprengstoffen auch ohne zusätzlichen Sauerstoff explodieren (Wüthrich 2003; Klapötke 2009). Somit steht als Oxidationsmittel anfangs nur der in den Nitrogruppen vorhandene Sauerstoff zu Verfügung.

Da die Explosion durch eine plötzliche, lokale Energiezufuhr durch starke, kurze Erhitzung, Schlag oder beides ausgelöst werden kann, ist davon auszugehen, dass die dadurch ausgelöste Schockwelle (Wikipedia, „Stoßwelle“, 2025) zu einer kurzzeitigen, lokalen Verzerrung des ansonsten stabilen rhombischen Kristallgitters des TNT führt. Bei dieser Verzerrung des Kristallgitters kommt es vermutlich zu einer Annäherung von Nitrogruppen aus verschiedenen (benachbarten) Schichten des Kristallgitters (s. z.B. Abb. 5), was zu chemisch instabilen Situationen führt. So könnten sich aus zwei nahe beieinanderliegenden $–NO_2$-Gruppen mit einem erheblichen Energiegewinn vorrangig zum Beispiel Stickstoff- und Sauerstoffmoleküle bilden:

$$2\ (–NO_2) \rightarrow N_2 + 2\ O_2.$$

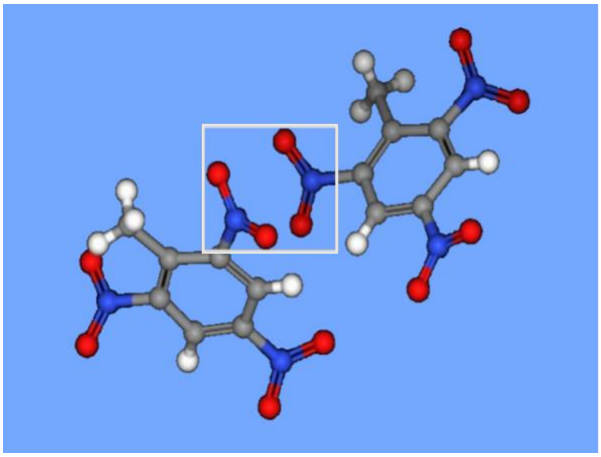


Abb. 5 3D-Ansicht zweier Moleküle 2,4,6-Trinitrotoluol mit angenäherten NO_2-Gruppen (weiß eingerahmt), die zu N_2 und $2\ O_2$ reagieren. Färbung der Atome: Kohlenstoff = grau, Wasserstoff = weiß, Sauerstoff = dunkelblau, Stickstoff = rot (N.I. Golovina et al. 1995).

Bei der Detonation ohne Kontakt mit der umgebenden Luft entstehen bei unvollständiger Oxidation auch Methan (CH_4) und Kohlenmonoxid (CO), was bereits 1920 von Munroe und Howell ausführlich untersucht wurde (Munroe / Howell 1920):

$$2\ C_7H_5(NO_2)_3 \rightarrow 12\ CO + 2\ CH_4 + H_2 + 3\ N_2.$$

Welcher chemische Mechanismus diesem Prozess zu Grunde liegt, ist für unsere Betrachtung jedoch unerheblich. Entscheidend ist, dass dabei mindestens drei Mole der stabilen Gase Stickstoff und Sauerstoff entstehen, maximal aber auch 9 Mole, wenn alle drei

Nitrogruppen von zwei in Frage kommenden TNT-Molekülen aus benachbarten Schichten an der Reaktion auf ähnliche Weise miteinander reagieren.

Neben der extremen Hitzeentwicklung ist mit der Bildung der Gase Stickstoff und Sauerstoff auch ein sehr starker Druckanstieg verbunden, der die solitäre Schockwelle weiter antreibt und nicht einfach auslaufen lässt. Es läuft chemisch gesehen eine stark nichtlineare autokatalytische Reaktion ab, indem fortschreitend durch die Produktion der Gase der Druck in der Front steil ansteigt und so die lokale Verzerrung im Kristallgitter mit all ihren Folgen vorantreibt. Das erklärt die hohe Geschwindigkeit, mit der sich die Welle durch den ganzen Körper des Sprengstoffes fortpflanzt. Bei all diesen Reaktionen in der Front der Schockwelle bedarf es keines zusätzlichen Sauerstoffs!

Die Hitze und der Gesamtdruck in der Geschoßhülle werden dabei schließlich so groß, dass der Stahlmantel zerrissen wird und somit Sauerstoff von außen Zutritt zum Sprengsatz hat und in der darauffolgenden Explosion die vollständige Oxidation desselben erfolgen kann.

Um nun die Entropie abzuschätzen, die mit dieser chemischen Reaktion verbunden ist, benötigen wir sowohl das Ausgangsvolumen und auch die mögliche Anzahl der Mole, die sich bei der unter Luftabschluss erfolgenden Detonation in der Geschoßhülse entwickeln. Wie allgemein bekannt, ergibt sich das Volumen des Sprengstoffes von 1 t TNT aus seiner Masse m dividiert durch seine Dichte $\rho = 1{,}64\,\mathrm{g/cm^3}$ zu $V_{1\mathrm{t\,TNT}} = 0{,}61\mathrm{m^3}$, also zu ca. einem halben Kubikmeter. Die Anzahl n der Mole von einer Tonne TNT lässt sich gemäß $n = m/M$ aus seiner molaren Masse $M = 227{,}1\,\mathrm{g/mol}$ berechnen und beträgt ca. $4{,}4 \cdot 10^3\,\mathrm{mol}$.

In einer groben Abschätzung gehen wir davon aus, dass bei der Reaktion aller Nitro-Gruppen zweier aufgrund der Gitterverzerrung benachbarter Moleküle TNT gemäß der Gleichung

$$3 \cdot [2\,(\text{–}NO_2) \rightarrow N_2 + 2\,O_2]$$

maximal 3 N_2 und 6 O_2 Moleküle, also 9 gasförmige Reaktionsprodukte entstehen.

Auf Grund der dabei entstehenden großen Hitze, wäre auch das bei einer von uns angenommenen Reaktion in der internen Schockwelle ohne externe Sauerstoffzufuhr

$$2\,C_7H_5(NO_2)_3 \rightarrow C_7H_8 + H_2 + 7\,CO + 2{,}5\,O_2 + 3\,N_2$$

als Zwischenprodukt entstehende Toluol und der zusätzliche Wasserstoff gasförmig. Es sei an dieser Stelle noch einmal betont, dass die Reaktion mit einer solchen Geschwindigkeit abläuft, dass wir keine Zwischenprodukte beobachten können, wir aber vermuten, dass die aromatische Struktur des TNT aufgrund ihrer Stabilität zwischenzeitlich zumindest teilweise erhalten bleibt.

Insgesamt haben wir nach der Reaktion in der vom äußeren Sauerstoff abgeschirmten Geschoßhülse $n = 14{,}5$ Mole gasförmige Produkte, die aus 2 Molen nicht gasförmigem, kristallinem TNT entstanden sind. Bezogen auf ein Mol TNT ergibt sich rechnerisch die Größe von $n_{\mathrm{Gase}} = 7{,}25\,\mathrm{mol}$. Da 1 t TNT wie oben angegeben einer Anzahl Mole TNT von $4{,}4 \cdot 10^3\,\mathrm{mol}$ entspricht, muss n_{Gase} noch mit diesem Wert multipliziert werden, um die gesamte Molzahl der gasförmigen Produkte zu erhalten.

Zur Ermittlung des Gasdruckes p der Menge des neuen entstandenen Gases verwenden wir der Einfachheit halber das Gasgesetz für ideale Gase, wohl wissend, dass es sich bei den hier herrschenden Gasdrücken und Temperaturen nur um eine recht grobe Abschätzung handeln kann:

$$p = \frac{n}{V} RT,$$

wobei $R = 8{,}3145\ [\mathrm{J\ mol^{-1}K^{-1}}]$ die universelle Gaskonstante und $T = 310\ °\mathrm{C} = 588{,}15\ \mathrm{K}$ die Zündtemperatur ist (Ledgard 2023, Seite 151) ist. Es ergibt sich dabei ein Druck von

$$p = \frac{7{,}25 \cdot 4{,}4 \cdot 10^3\ [\mathrm{mol}]}{0{,}61\ [\mathrm{m^3}]} \cdot 8{,}3145 \left[\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{mol\ K}}\right] \cdot 588\ [\mathrm{K}] = 2{,}56 \cdot 10^8 \left[\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{m^3}}\right]$$
$$= 2{,}52 \cdot 10^3\ [\mathrm{atm}],$$

wobei gilt: $1\ \mathrm{J/m^3} = 1\ \mathrm{Pa} = 0{,}987 \cdot 10^{-5}\ \mathrm{atm}$.

Bei diesem Druck von ca. $2500\ \mathrm{atm}$ und der Temperatur von $315\ °\mathrm{C}$ zerplatzt die Geschoßhülle mit einer großen Explosion, die wiederum mit einer Schockwelle verbunden ist; dabei werden alle entstanden Gasmoleküle in die Umgebung geschleudert. Die noch nicht vollständig oxidierten Toluol-Moleküle mit den verbliebenen Nitro-Gruppen werden durch den unmittelbaren Zusammenprall mit dem Sauerstoff der äußeren Luft zu Kohlendioxid CO_2 und Wasser H_2O fast vollständig oxidiert bzw. bleiben im kühleren Teil der herausgeschleuderten Gase als feinste Rußpartikel bzw. Feinstaub partiell erhalten, was als weißer Wasserdampf und seine teils schwarzen Ränder erkennbar ist.

Was aber geschieht mit dem Teil der nach der unvollständigen Oxidation in der Geschoßhülse noch verbliebenen Kohlenwasserstoffe, die nun nach dem Zerplatzen der Geschoßhülse dem großen Sauerstoffvorrat der Atmosphäre ausgesetzt sind? Sie unterliegen einer vollständigen Oxidation gemäß:

$$2\ C_7H_8 + 18\ O_2 \rightarrow 14\ CO_2 + 8\ H_2O.$$

Im Hinblick auf den Beitrag dieser Reaktion zur Entropieerzeugung bei der Explosion müssen wir uns die Änderung der damit verbundenen Molzahlen anschauen. Wir gehen davon aus, dass es sich bei dieser externen Explosion ganz ähnlich verhält wie bei der Ausdehnung eines Gases in ein Vakuum. In dem kleinen Ausgangsvolumen von ca. einem halben Kubikmeter $V_{1\,\mathrm{t\,TNT}} = 0{,}61\ m^3$, in dem ein Druck von $p \approx 2500\ \mathrm{atm}$ herrscht, strömt das darin enthaltene heiße Gas gegen die umgebende Luft mit einem Druck von ca. $1\ \mathrm{atm}$ aus. Das ist fast, als würde das heiße Gas sich in ein Vakuum ausdehnen (s. Abschnitt 5.4).

Selbstverständlich ist das nicht der Fall. Es handelt sich hier eben nicht um einen isothermen Vorgang, denn das heiße Gas kühlt sich dabei ab. Auch ist das Explosionsgas schon gar kein ideales Gas. Zudem besteht es aus vielen verschiedenen Gasen, wobei wir annehmen, dass sie gut durchmischt sind im Gegensatz zu der kristallinen Struktur vor der Explosion.

Das explodierende System leistet darüber hinaus Arbeit, indem es die umgebende Luft verdrängt und eine Stoßwelle in der umgebenden Luft auslöst. Auch leistet es Arbeit, indem es die Geschoßhülle zersprengt sowie das Angriffsziel bzw. das Target. Das oben erwähnte Einfamilienhaus wird gesprengt, wobei größere und kleinere makroskopische Teile weggeschleudert werden und dadurch einen Teil der durch die chemischen Reaktionen bei der Reaktion erzeugten Energie als kinetische Energie gemäß der bekannten Gleichung $E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2$ in Anspruch nehmen. Diese Energie wird aber beim Landen der Bruchstücke wieder in Wärme umgesetzt.

Wir sind uns all dessen bewusst! Dennoch genügt diese idealisierende Herangehensweise der Forderung, sich ein Bild von der Größenordnung der Entropieproduktion bei der Explosion von Granaten und Bomben zu verschaffen. Darüberhinausgehende Berechnungen würden den Rahmen dieser Publikation bei weitem übertreffen und ihrem Zweck nicht dienen.

7.2. Einfluss der Wärmestrahlung auf Explosionsgeschehen und Temperaturverhalten

K. Wüthrich macht in seinem sehr ausführlichen Beitrag zur „Physik der Explosion" (Wüthrich 2003, Kap. 4.2.1) aber noch auf einen anderen, sehr wesentlichen Aspekt des Explosionsgeschehens aufmerksam. Unter dem Begriff der Schadensabschätzung kommt er auch auf die bei einer Explosion freiwerdende *Wärmestrahlung* zu sprechen. Nach der Sprengung der Geschoßhülse agiert der verbliebene Sprengstoff gewissermaßen als CH-Sprengstoff, der nun als *unverdämmtes Brennstoff-Luft-Gemisch* mit einem leuchtenden Feuerball vom Radius R_F verbrennt, an dessen Oberfläche eine Temperatur von $T_F = 2000\ \mathrm{K}$ herrscht, die eine wesentliche Rolle bei der Dissipation der freigesetzten chemischen Energie übernimmt. Trifft nun die abgestrahlte Energie auf ein entferntes Objekt O, das diese Energie selbst wieder abstrahlt, so stellt sich ein Strahlungsgleichgewicht ein, wobei für die Oberflächentemperatur T_O des Objektes gilt, dass sie gemäß der Beziehung $T_O \propto r_O^{-1/2}$ mit der Entfernung r_O des Objekts vom Ursprung des Feuerballs abklingt. Sie klingt also weit weniger rasch ab als im Fall der Wärmeleitung, wo die Temperatur gemäß der Beziehung $T_{O,klass.} \propto r_O^{-1}$abfällt.

Um sich eine Vorstellung von der Wirkung der bei einem Feuerball entstehenden Wärmestrahlung zu machen, führt Wüthrich das Beispiel einer dicken, schwarzen Holzplatte an, die in der Entfernung $R_H \geq R_F$ vom Zentrum der Explosion aufgestellt ist (Wüthrich 2003). Dann wird, wenn die Platte sich dicht genug am Feuerball positioniert ist, die dem Feuerball zugewandte Seite der Holzplatte auf die Temperatur $T_H = 500\ \mathrm{K}$ gebracht, bei der sie augenblicklich entflammt.

Ersetzen wir nun das Objekt O durch die Holzplatte H und quadrieren die Beziehung $T_O \propto r_O^{-1/2}$, so ergibt sich, dass sich der Radius R_F des Feuerballs und die Entfernung R_H der Holzplatte von der Oberfläche des Feuerballs umgekehrt proportional verhalten wie die Quadrate der Temperaturen T_F an der Oberfläche des Feuerballs und T_H an der Oberfläche der Holzplatte:

$$\frac{R_H}{R_F} = \frac{{T_F}^2}{{T_H}^2} \quad \text{und somit} \quad R_H = \frac{{T_F}^2}{{T_H}^2} \cdot R_F.$$

R_H kann somit als Vielfaches m des Radius des Feuerballs ausgedrückt werden mit $m = {T_F}^2/{T_H}^2$.

Bei einer Oberflächentemperatur $T_F = 2000\ \mathrm{K}$ von CH-Feuerbällen und der Flammtemperatur $T_H = 500\mathrm{K}$ von Holz entzündet ein Feuerball mit dem Radius R_F die Holzplatte bis zu einer maximalen Entfernung von $(2000\ \mathrm{K}/500\ \mathrm{K})^2 \cdot R_F = 16 \cdot R_F$, d.h. dem $m = 16$-fachen von R_F. Befindet sich also die Holzplatte oder ein anderes organisches Material im Umkreis von 16 Radien vom Explosionsort entfernt, dann verbrennt es augenblicklich einzig auf Grund der auftreffenden Wärmestrahlung. Wenn man je nach Munitionsart von einem Feuerball vom Radius 5 bzw. 10 m ausgeht, dann umgibt den Explosionsort eine Todeszone mit einem Radius von 80 bzw. 160 m.

Was aber ist diese ominöse Wärmestrahlung? Es ist eine elektromagnetische Strahlung, die erstmals von Josef Stefan (Stefan 1879) experimentell nachgewiesen und später dann von Ludwig Boltzmann auf der Basis der Elektrodynamik erklärt wurde (Boltzmann 1884). Boltzmann war es, der das nach ihnen benannte Stefan-Boltzmann'sche Strahlungsgesetz herleitete. Für die gesamte Strahlung eines schwarzen Körpers J_O gilt, integriert über alle Frequenzen und alle Raumwinkel einer Halbkugel, die Beziehung: $J_O = \sigma T^4$ (s. unten).

Wir können diese Wärmestrahlung – anders als das Licht, das auch eine elektromagnetische Strahlung ist, – nicht sehen, wohl aber fühlen, eben als Wärme. Als elektromagnetische Strahlung besteht die Wärmestrahlung ebenso wie das sichtbare Licht aus Photonen. Das lässt die Möglichkeit zu, sich die Wärmestrahlung als ein Gas bestehend aus Photonen vorzustellen, wobei die einzelnen Photonen nicht miteinander wechselwirken, so dass das „Photonengas" *ideal* ist (entsprechend dem Superpositionsprinzip für elektromagnetische Strahlung). Auf diesem diskreten Ansatz aufbauend behandeln L. Landau und J. Lifschitz in ihrem Lehrbuch der Theoretischen Physik – Statistische Physik (Landau / Lifschitz 1971) die Wärmestrahlung im Sinne der Thermodynamik wie ein Gas mit besonderen Eigenschaften und leiten für dieses Gas, das Photonengas, die entsprechenden thermodynamischen Größen wie die freie Energie oder die Entropie her. Dieses Verständnis der Wärmestrahlung, aber auch jeder anderen elektromagnetischen Strahlung wie z.B. des sichtbaren Lichts, passt gut zusammen mit den oben erwähnten Vorstellungen zur Disgregation von R. Clausius.

Nun sind die thermodynamischen Größen nur definiert, wenn das betrachtete System sich im Gleichgewicht befindet. Um das zu gewährleisten, muss die Wärmestrahlung, wenn sie nicht durch das Vakuum, sondern durch die Luft hindurchgeht, zumindest mit einigen Molekülen wechselwirken, um ein Gleichgewicht herzustellen, da die Photonen selbst ja nicht miteinander wechselwirken können. Diese Wechselwirkungen müssen jedoch genügend klein sein, um das Photonengas als *„ideal"* beschreiben zu können. Auch das stimmt völlig überein mit der klassischen Definition eines *idealen Gases* in der Thermodynamik. Die Herstellung eines Gleichgewichtes im Photonengas erfolgt nun durch Absorption und Emission der Photonen durch die Moleküle.

Wie zuvor bei einem *idealen Gas* kann man auch für das *ideale Photonengas* dessen thermodynamische Eigenschaften ermitteln. Aus den Strahlungsdaten des Photonengases ergibt sich für die freie Energie F (s. Abschnitt 5.4) der Ausdruck:

$$F = -\frac{4\sigma}{3c} V T^4,$$

wobei c die Lichtgeschwindigkeit, V das Strahlungsvolumen des schwarzen Körpers, T seine Temperatur und $\sigma = 5{,}67\ 10^{-5}\ [\mathrm{gs^{-2}K^{-4}}] = 5{,}67\ 10^{-8}\ [\mathrm{Wm^{-2}K^{-4}}]$ die Stefan-Boltzmann- Konstante ist. Mit der partiellen Ableitung der freien Energie nach der Temperatur erhält man für die Entropie:

$$S = \frac{\partial F}{\partial T} = -\frac{16\sigma}{3c} V T^3.$$

Da nun wie in Abschnitt 5.4 ausgeführt für die Freie Energie die Beziehung $F = U - T\,S$ gilt, folgt für die innere Energie U des idealen Photonengases:

$$U = F - TS = -\frac{4\sigma}{3c} V T^4 + T\left(\frac{16\sigma}{3c} V T^3\right) = \frac{4\sigma}{c} V T^4.$$

„Die gesamte Energie der Wärmestrahlung U ist also proportional der vierten Potenz der Temperatur." (Landau / Lifschitz 1971, S. 182). Die gesamte Intensität J_O der Emission der Strahlung eines im thermischen Gleichgewicht mit seiner Umgebung befindlichen absoluten *schwarzen Körpers*, also der Strahlungsenergie dividiert durch die Zeit und die bestrahlte Fläche, ist ebenfalls proportional der vierten Potenz seiner Temperatur.: $J_O = \sigma T^4$ (Landau / Lifschitz 1971, S. 185).

Am Beispiel des Behaglichkeitsempfindens eines Menschen wollen wir kurz zeigen, welche Rolle die Wärmestrahlung im alltäglichen Leben spielt, was auch bei der Planung des Raumklimas beim Komfort von Gebäuden von großer Bedeutung ist (Dentel / Dietrich 2006 / DIN EN ISO 7730:2006-05). Das Behaglichkeitsempfinden hängt unter anderem

von einem ausgewogenen Strahlungsaustausch der Person mit der Umgebung ab. „Bei leicht sitzender Tätigkeit erzeugt eine Person infolge ihrer Stoffwechselrate etwa 130 W an Wärme“ (Wikipedia, „Strahlungsaustausch“, 2024). Wir erzeugen also selber Wärme mit einem Energiefluss von $130\ [\mathrm{Ws/s}]$ und strahlen diesen über die Körperoberfläche ab mit einem Energiefluss von $900\ \mathrm{W}$, d.h. wir müssten eigentlich frieren. Wir haben ein Behaglichkeitsempfinden nur dann, wenn dieser Wärmeverlust von $770\ \mathrm{W}$ durch äußere Wärmezufuhr, vor allem durch Strahlung von Heizungsöfen oder Sonnenlicht wieder ausgeglichen wird. „Sie (Die Person, d. Autoren) erfriert nur deshalb nicht, weil eine wohltemperierte Umgebung ihr zum Beispiel 770 W an Wärme zustrahlt“ (Wikipedia, „Strahlungsaustausch“, 2024).

Auf die Bedeutung der Strahlungsbilanz zwischen Sonne und Erde sowie die Aufheizung der Atmosphäre infolge ständig zunehmender Entropieproduktion, unter anderem im Zusammenhang mit immer zerstörerischen Kriegen, werden wir im abschließenden Kapitel noch näher eingehen.

7.3. Ermittlung der Reaktionsentropie bei der Detonation von TNT

Zu Beginn dieses Abschnitts wurde bereits erwähnt, dass die freie Energie ΔG einer chemischen Reaktion gleich der durch die Reaktion zur Verfügung gestellten Energie, der Enthalpie ΔH, abzüglich der durch die Entropieerzeugung ΔS erfolgten Wärmemenge $T\Delta S$ ist. Nach Klapötke (Klapötke 2009) kann man in der Praxis allerdings oft in guter Näherung $\Delta G = \Delta H$ setzen, so dass

$$\Delta G = -T\Delta S \quad \text{bzw.} \quad \Delta H = T\Delta S.$$

Die Enthalpie ΔH fasst alle Reaktionen, die bei der Detonation von TNT geschehen können, zusammen und ist nur vom Ausgangs- und Endzustand abhängig. Sie entspricht der Explosionswärme Q einer vorgegebenen Menge m eines Sprengstoffs, die eine Aussage über das Arbeitsvermögen des Sprengstoffes liefert. Auch wenn während der Explosion chemische Energie in mechanische, Oberflächen- oder Strahlungsenergie umgewandelt wird, wird die gesamte freiwerdende Energie letztlich in Entropie umgewandelt. Bezogen auf Standardbedingungen ($273\ \mathrm{K}, 1\ \mathrm{bar}$) gibt Klapötke für die Explosionswärme Q (spezifische Enthalpie $\Delta H/m$) von TNT einen Wert von $4247\ \mathrm{kJ/kg}$ an (Klapötke 2009, Tabelle 22, Seite 73). Unter diesen Voraussetzungen ergibt sich für die Entropie bei der Explosion von 1 t TNT bei Raumtemperatur ($293\ \mathrm{K}$):

$$\Delta S = \frac{Q \cdot m}{T} = \frac{4247\ [\mathrm{kJ/kg}] \cdot 1000[\mathrm{kg}]}{293[K]} = 1{,}45 \cdot 10^4 \left[\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{K}}\right] = 4{,}0 \left[\frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{K}}\right].$$

Geht man für die Explosionswärme von TNT von einem Wert von $3612\ \mathrm{kJ/kg}$ aus, wie er in anderen Quellen angegeben ist (s. z.B. Wikipedia, „Trinitrotoluol“, 2023), so erhält man eine Entropie von $3{,}4\ \mathrm{kWh/K}$. Auch aus den Explosionswärmen anderer Explosivstoffe (Klapötke 2009) ergeben sich Entropien in der Größenordnung von $3\ \text{bis}\ 5\ \mathrm{kWh/K}$.

Letztendlich haben wir also lauter Zerstörung, Staub und Hitzeentwicklung erzeugt.

8. Zusammenfassung – Auswirkung der Entropieproduktion auf das Klima

Es gibt eine Vielzahl sehr lesenswerter Publikationen von W. Ebeling und R. Feistel, in denen sie im Zusammenhang mit dem Einsatz von Explosivwaffen in den großen Kriegen des letzten wie auch des jetzigen Jahrhunderts unter Hinweis auf die unbedingte Gültigkeit des II. Hauptsatzes der Thermodynamik – die Unumkehrbarkeit der Entropieproduktion bei nicht-umkehrbaren, also irreversiblen Prozessen – hingewiesen haben. In der Arbeit von

W. Ebeling, R. Feistel, E.C. Haß und P. Plath (Ebeling et al. 2023) haben wir die klimawirksame Erzeugung von Feinstaub in diesen Kriegen mit den größten bekannten Vulkanausbrüchen in den letzten zehntausend Jahren verglichen. In der Frage der mit diesem Waffeneinsatz verbundenen Entropieproduktion blieben unsere Aussagen im Detail quantitativ gesehen jedoch recht vage. Die qualitative Aussage zur Entropieproduktion blieb trotz aller physikalisch gut begründeten und vollkommen gerechtfertigten Aussagen für den Leser nicht immer nachvollziehbar und oft auch nicht mit seinem Verständnis der Welt vereinbar.

Auch der Hinweis auf einen möglichen Wärmetod - also die vollständige Klimakatastrophe (Zusammenbruch des Klimaprozesses) wird heute weitgehend negiert – nicht zuletzt auch auf Grund der aggressiven Argumentation gegen die Wärmetodhypothese von Clausius bis in die zweite Hälfte des 20. Jahrhunderts hinein. Darüber hinaus blieb der Begriff der Entropie selbst Teilen der interessierten Öffentlichkeit bis heute ein Buch mit sieben Siegeln. Man strich, schob und schiebt diesen Begriff und die daraus sich ergebenden Konsequenzen aus dem Gedächtnis und nimmt ihn lieber nicht zur Kenntnis.

Wir haben deshalb in dieser Arbeit den Versuch unternommen, den Begriff der Explosivwaffen und der mit ihrem Einsatz verbundenen Entropieproduktion möglichst an Hand allgemeinverständlicher Beispiele zu erklären. Leider mussten wir uns – wenn auch möglichst sparsam – der heute üblichen Ausdrucksweise mathematischer Formeln bedienen. Wir haben dabei ganz vorsichtig, nur zaghaft „die Eiswüste der Abstraktion betreten“ (Adorno 1966; Habermas 1975). Dem großen Vorbild R. Clausius (Clausius 1867) gänzlich auf Formeln und Berechnungen zu verzichten, konnten wir nicht folgen. Es hätte unser Bemühen um Verständlichkeit zu sehr beeinträchtigt.

Oftmals haben wir die großen Fragen auf die kleineren Vorgänge im Haushalt bzw. im Bereich von Kubikzentimeter, Kilogramm und Mol heruntergebrochen. Das mag ihre Bedeutung für das Klima stark herabsetzen. Darum sei es uns an dieser Stelle erlaubt, sie in einigen wenigen Beispielen wieder „upzugraden“ auf ihre wahre Rolle im Klimageschehen und ihrer damit verbundenen ökonomischen Bedeutung.

Da gibt es das von uns immer wieder stark zitierte Beispiel von der Bombe mit der Sprengkraft von 1 t TNT (1 Tonne TNT); das ist schon eine recht große konventionelle Explosivmunition, die in der Regel von einem Bomber-Flugzeug abgeworfen werden muss.

Das andere von uns erwähnte Beispiel ist die Munition vom Kaliber 155 mm, die von der Panzerhaubitze 2000 verwendet wird und eine Sprengkraft von 6 bis 10 kg TNT besitzt (s. Abschnitt 4). Davon wurden 422.000 Schuss aus Bundeswehr- und Industriebeständen und weitere 327.000 Schuss zuvor bereits an die Ukraine geliefert, insgesamt 749.000 Schuss (Die Bundesregierung, 2025). Bei Annahme eines mittleren Wertes von 7,5 kg TNT pro Granate wurden also ca. 5620 Tonnen TNT einzig bei Verwendung dieser Granate aus bundesdeutscher Lieferung verschossen. Es bleibt dem Leser anheimgestellt, diese Zahlen zu ergänzen und sich ein Bild von der Größe des Einsatzes von TNT im Ukrainekrieg auf beiden Seiten zu machen. Als Hilfestellung sei mit ca. 20 Gew.-% der prozentuale Gehalt an TNT-Sprengstoff eines modernen Artilleriegeschosses angegeben, mit dessen Hilfe man aus dem Gesamtgewicht des Geschosses die Menge des darin enthaltenen TNT abschätzen kann.

Und das ist nur ein Teil des deutschen Beitrags zur Zerstörung und Entropieerzeugung im Ukraine-Krieg!

Betrachten wir abschließend die neue, viel diskutierte Lieblingswaffe der öffentlichen Diskussion in Deutschland, den Marschflugkörper Taurus (Wikipedia, „Taurus (Marschflugkörper)“, 2025), die mit 0,6 bis 0,95 Mach (fast Schallgeschwindigkeit) ihr Ziel erreicht und bis zu 16 Subsprengkörper mit einem Gesamtgewicht von 480 kg

(Sprengstoffsystem Mephisto) bzw. bei konventionellem Gefechtskopf mit einer Sprengkraft von 450 kg TNT ausgestattet ist. Ihr Stückpreis beträgt ca. 1.000.000 Euro. Diese Waffe dient als Bunkerbrecher vor allem für Flugzeugbunker. Davon hat die Bundeswehr bereits 600 Stück zum Gesamtpreis von 570 Millionen Euro gekauft. Sie stellt mit einer ½ Tonne TNT Sprengkraft eine moderne, digitale gesteuerte Version der oben diskutierten 1 t TNT Bombe dar.

Ja, wir können diese schrecklich großen Zahlen ausrechnen, aber vermitteln all diese Zahlen einen Eindruck von der Bedeutung der Entropieerzeugung in den modernen Kriegen? Doch wohl eher nicht. Eine Tonne TNT bleibt eine abstrakte Größe, eine Zahl wie jede andere. Und trotz des oft sehr erregt geführten Streits um den Einsatz von Taurus Marschflugkörpern mit immerhin ½ Tonne Sprengkraft (TNT Äquivalent) und dem Preis von ca. 1 Millionen € pro Stück ist die Faszination der Zerstörung, die man damit beim Gegner erzielen kann, weit erregender – Aufmerksamkeit auf sich ziehender – als jeder Gedanke an die damit verbundene Entropieproduktion und deren Auswirkung auf das Klima.

Versuchen wir aber dennoch, diesen Zusammenhang in einem Bild zu verdeutlichen. Die gesamte Energie, die bei dem chemischen Prozess der Explosion von 1 t TNT freigesetzt wird, beträgt nach Klapötke (Klapötke 2009, Tabelle 22, Seite 73) $\Delta H = 4247\ [\mathrm{kJ/\ kg}] \cdot 1000\ [\mathrm{kg}] = 1180\ \mathrm{kWh}$, liegt also in der Größenordnung von 1 MWh (Megawattstunde) pro 1 t TNT. Diese chemische Energie wird in mechanische Energie, Strahlungsenergie, Mischungs- und Oberflächenenergie verwandelt. Ja, es wird auch Arbeit dabei verrichtet, in Form der Ausdehnung der dabei entstehenden Gase gegen den vorhandenen Luftdruck, dem Zerreißen der Geschoßhülse sowie der Zerstörung des Targets. Aber all die damit verbundene kinetische Energie verwandelt sich schließlich in reine Wärmeenergie. Vergleicht man zwecks Bestimmung der Entropie, die mit dieser Verwandlung verbunden ist, die Anfangssituation vor der Explosion mit der Situation danach, dann hat ganz im Sinne von Clausius eine Disgregation bzw. eine Zerstörung stattgefunden. Die Temperatur ist dabei praktisch gleichgeblieben, so dass die Entropie wie oben gezeigt grob abgeschätzt werden kann: $\Delta S = \Delta H / T_{Umgebung} = 1180\ [\mathrm{kWh}]/293\ [\mathrm{K}] \approx 4\ [\mathrm{kWh/K}]$. Die erzielte Zerstörung ist aus thermodynamischer Sicht eben die Disgregation. Wir fördern damit die Bildung von Wüsten () und erwärmen dabei die Erdoberfläche sowie die unteren Schichten der Atmosphäre.

Abb. 6 Sandwellen im Wüstensand. Als disgregiertes, fein verteiltes Gestein ist der Sand der Wüsten Träger von Entropie und die immer weitere Ausbreitung der Wüstenzonen auf der Erde ist ein illustratives Beispiel für die menschengemachte, unnötige Entropieerzeugung. (Foto: P. Plath).

Im Zusammenhang mit der Verschmutzung der Erdoberfläche und der Meere möchten wir kurz die im April dieses Jahres veröffentlichte hoch interessante Studie "Global environmental plastic dispersal under OECD policy scenarios toward 2060" von Jeroen Sonke et al. vom CNRS in Toulouse erwähnen (Sonke et al. 2025), die in der Tagespresse berechtigter Weise ein breites Interesse fand. In dieser Publikation wird nicht nur ein erschreckender Zustand der Verschmutzung der Meere mit Plastikmüll beschrieben, sondern darüber hinaus u.a. eine Verdreifachung des Plastikabfall-Aufkommens bis zum Jahr 2060 durch eigene Studien belegt. Demnach hat sich seit 1950 die auf fossilen Brennstoffen basierende Plastikproduktion auf insgesamt 10.000 Teragramm $(1\ \mathrm{Tg} = 10^{12}\mathrm{g} = 10^{9}\mathrm{kg} = 10^{6}\mathrm{t})$ erhöht. Ja, das hat nicht unbedingt etwas mit der direkten Wirkung von Explosivwaffen zu tun, wohl aber indirekt mit den Kriegen (z.B. vollständige Zerstörung des Gaza-Streifens) – es ist ja nicht nur Zement, der von den Bomben und Granaten pulverisiert wird – und der Verelendung weiter Teile der Erdbevölkerung, die sich der Plastikprodukte fast ausschließlich für ihr tägliches Leben bedienen müssen. Wir werden auf diese Problematik in einem weiteren Artikel gesondert eingehen.

8.1. Ausblick – Grenzen der Menschen-gemachten Entropieerzeugung

Die im letzten Kapitel behandelte Wärmestrahlung, die mit den Explosionen verbunden ist, gibt uns auch die Möglichkeit, die thermodynamischen Bedingungen für das Leben auf der Erde zu verstehen.

In ihrem sehr detaillierten und lehrreichen Buch „Physik der Evolutionsprozesse" betrachten W. Ebeling und Mitarbeiter (Ebeling et al. 1990, S. 77-81) die Strahlungsbilanz zwischen Sonne und Erde. Dabei gehen sie davon aus, dass die Erde von der Sonne eine Strahlung empfängt, die von einer Temperatur $T_{\mathrm{Sonne}} = 5770\ \mathrm{K}$ herrührt, wie sie auf der Oberfläche der Sonne herrscht. Dies entspricht pro Sekunde einem externen Energiefluss, also einer Strahlungsleistung von $dE_{\mathrm{ex}}/dt = 1{,}74 \cdot 10^{17}\ [\mathrm{Ws}/s] = 1{,}74 \cdot 10^{17}\ \mathrm{W}$. Davon werden nur ca. 70 %, also $1{,}22 \cdot 10^{17}\ \mathrm{W}$, von der Erde einschließlich ihrer Atmosphäre bis in die Höhe von 90 km absorbiert (Fortak 1979; Wikipedia, „Strahlungsaustausch", 2024). Der übrige Teil von ca. 30 % des Sonnenlichtes wird an der äußeren Atmosphäre in der Höhe von 90 km in den Weltraum reflektiert. Bezieht man diesen Energiefluss der Strahlung auf die Oberfläche der Erdkugel einschließlich ihrer Atmosphäre mit dem Radius $r_{\mathrm{E_A}} = 6371\ \mathrm{km} + 90\ \mathrm{km} = 6461\ \mathrm{km}$ mit einer Größe von $O_{\mathrm{E_A}} = 4\pi\left(r_{\mathrm{E_A}}\right)^2 = 5{,}246 \cdot 10^{14}\ \mathrm{m}^2$, so ergibt sich für einen Quadratmeter Oberfläche eine mittlere externe Energieflussdichte bzw. Leistungsdichte oder Strahlungsintensität von:

$$J_{\mathrm{e}} = \frac{1{,}22 \cdot 10^{17}\ [\mathrm{W}]}{5{,}246 \cdot 10^{14}\ [\mathrm{m}^2]} = 0{,}233 \cdot 10^{3}\ [\mathrm{W/m^2}] \approx 230[\mathrm{W/m^2}].$$

Das entspricht den ca. 70 % der als Solarkonstante bezeichneten, insgesamt auf diese Oberfläche auftreffenden Energieflussdichte bzw. Intensität von $340\ \mathrm{W/m^2}$.

Um das Strahlungsgleichgewicht zu erzeugen bzw. die Bedingung des *idealen Photonengases* einzuhalten, muss die von der Erde absorbierte Energie wieder vollständig zurückgegeben werden, was über eine langwellige Wärmestrahlung erfolgt, die allseitig in den Weltraum abgestrahlt wird. Das geschieht, eine ideal wärmeleitende Erdkugel vorausgesetzt, bei einer mittleren Strahlungstemperatur von minus 18 °C (Wikipedia, „Strahlungsaustausch", 2024) bzw. -20 °C (Ebeling et al. 1990), also der mittleren Temperatur der äußeren Atmosphärenschicht in 90 km Höhe von $T_{\mathrm{E_A}} = 255\ \mathrm{K}$. Nach dem Gesetz für die Strahlungsintensität eines schwarzen Strahlers, $J_{\mathrm{e}} = \sigma T^4$ (s. Abschnitt 7.2), ergibt sich für

die gesamte Abstrahlung von der äußeren Atmosphärenschicht bei einer Energieflussdichte von $230\,\mathrm{W/m^2}$ eine Strahlungstemperatur von:

$$T = \left(\frac{J_\mathrm{e}}{\sigma}\right)^{-4} = \left(\frac{230\ [\mathrm{Wm^{-2}}]}{5{,}67 \cdot 10^{-8}\ [\mathrm{Wm^{-2}K^{-4}}]}\right)^{-4} = 252{,}4\ [\mathrm{K}] = -20{,}8\ [°\mathrm{C}].$$

Die Differenz zwischen den eingestrahlten und zurückgestrahlten Energieflussdichten bzw. Strahlungsintensitäten ist ausgeglichen, was sich aber auf der Sonnenoberfläche bei einem Sonnenradius von $r_\mathrm{Sonne} = 6{,}963 \cdot 10^5\ \mathrm{km}$ nur so auswirkt, als würde auf ihr maximal eine Energieflussdichte empfangen werden, die von einem schwarzen Körper mit einer Temperatur von ca. 27 K ausgeht.

Für die Entropiestromdichte, die mit dieser Strahlung verbunden ist, gilt (Ebeling et al. 1990):

$$J_\mathrm{s} = \frac{4}{3}\sigma T^3 = \frac{4}{3}\frac{J_\mathrm{e}}{T},$$

und die Differenz der pro Sekunde an der Oberfläche der äußeren Atmosphäre eingestrahlten und wieder ausgestrahlten Entropieflüsse ist demgemäß:

$$\Delta J_\mathrm{s,E_A} = \frac{4}{3} \cdot 1{,}22 \cdot 10^{17}\ [\mathrm{W}]\left(\frac{1}{5770\ [\mathrm{K}]} - \frac{1}{255\ [\mathrm{K}]}\right) = -6{,}1 \cdot 10^{14}\ [\mathrm{WK^{-1}}].$$

Damit ergibt sich eine Entropieflussdichte bezogen auf einen Quadratmeter der äußeren Oberfläche der Atmosphäre in Höhe von 90 km von:

$$\Delta J_\mathrm{s} = \frac{4}{3} \cdot 230\ [\mathrm{W}]\left(\frac{1}{5770\ [\mathrm{K}]} - \frac{1}{255\ [\mathrm{K}]}\right) \approx -1\ [\mathrm{WK^{-1}m^{-2}}],$$

die auf der Sonneneinstrahlung beruht und auch wieder von der Atmosphärenoberfläche abgestrahlt wird.

Das bedeutet, die erzeugte Entropie wird von der Erde in den Weltraum exportiert und setzt damit eine absolute Grenze für die Produktion von Entropie in der Atmosphäre und auf der Erdoberfläche (Ebeling et al. 1990). Wird diese Entropieproduktion auf der Erde oder in der Atmosphäre überschritten, kommt es unweigerlich zu einer Aufheizung der Atmosphäre bzw. zu einer Klimaerwärmung, die durch keine menschliche Maßnahme rückgängig gemacht werden kann.

Die größten Entropieproduzenten in der Atmosphäre sind die atmosphärischen Prozesse. Weit weniger wichtig für die Entropieproduktion sind die mit der Evolution biologischer und ökologischer Systeme verbundenen Prozesse. An Bedeutung gewinnen sie jedoch mit der durch Industrieproduktion und den Kriegen verbundenen Prozessen der Entropieerzeugung. Zur detaillierteren Beschreibung all dieser Prozesse verweisen wir auf unseren Artikel „Zu Problemen der mechanisch – chemisch – elektrischen Energiewandlung und des Transports hochwertiger Energie im Kontext des Klimawandels“ (Ebeling et al. 2023):

> „Das wichtigste Ziel der Entwicklungen neuer Technologien ist, mit möglichst wenigen Umwandlungen der Primärenergien auszukommen, die notwendigen effizient zu gestalten und die verlustreichen strikt zu vermeiden. Das ist in der Tat in der gegenwärtigen Periode der Evolution der Menschheit die einzige vernünftige Überlebensstrategie.“ (Ebeling al 2023)

Überbordende Rüstungsproduktion und Kriege gehören definitiv nicht dazu.

Die alte Idee vom Wärmetod wird Realität – nicht bezogen auf das Weltall, aber bezogen auf die bewohnbare Welt, unsere Erde. Es ist der menschengemachte Wärmetod und er ist durchaus real und lässt sich bereits durch den Einsatz konventioneller Explosivstoffe erreichen.

Und wenn wir all diese zerbombten Städte wieder aufbauen, ist dann nicht alles wieder in Ordnung? Haben wir dann nicht all die erzeugte Entropie wieder rückgängig gemacht, vernichtet bzw. exportiert? Leider, nein! Denn diese Prozesse sind irreversibel. Stattdessen haben wir noch mehr Entropie erzeugt!

Bibliographie

3M Science.Applied to Life™ (2025): „Oberflächenenergie kategorisieren". https://www.3mdeutschland.de/3M/de_DE/kleben-und-verbinden/schulung-weiterbildung/die-wissenschaft-des-klebens/oberflaechenenergie-kategorisieren/#. Abgerufen: 26.01.2025.

Adorno, Theodor W. (1966): *Negative Dialektik*. Frankfurt am Main: Suhrkamp Verlag (Erstausgabe).

ARTE.tv (23.07.2022): „Kann Geld aus dem Nichts entstehen?". https://www.arte.tv/de/videos/104840-009-A/kann-geld-aus-dem-nichts-entstehen/.

Boltzmann, Ludwig (1877): „Über die Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatze der mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung respektive den Sätzen über das Wärmegleichgewicht." *Wien Ber.*, 76, 373–435. Nachdruck in: *Wissenschaftliche Abhandlungen von Ludwig Boltzmann*, II. Band (1875-1881), hrsg. von Hasenöhrl, Fritz. Leipzig: Verlag von Johann Ambrosius Barth, 164–223.

Boltzmann, Ludwig (1884): „Ableitung des Stefan'schen Gesetzes, betreffend die Abhängigkeit der Wärmestrahlung von der Temperatur aus der electromagnetischen Lichttheorie". *Annalen der Physik und Chemie*, 22, 291–294.

Brdička, Rudolf (1963): *Grundlagen der physikalischen Chemie*. Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, 4. Auflage.

Clausius, Rudolph (1850): „Ueber die bewegende Kraft der Wärme und die Gesetze, welche sich daraus für die Wärmelehre selbst ableiten lassen". *Poggendorffs Annalen*, 79, 368–397, 500–524.

Clausius, Rudolph (1854): „Ueber eine veränderte Form des zweiten Hauptsatzes der mechanischen Wärmetheorie". *Poggendorffs Annalen*, 93, 481–506.

Clausius, Rudolph (1865): „Ueber verschiedene für die Anwendung bequeme Formen der Hauptgleichungen der mechanischen Wärmetheorie". *Annalen der Physik und Chemie*, 125, 353–400.

Clausius, Rudolph (1867): „Über den zweiten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie. Ein Vortrag, gehalten in einer allgemeinen Sitzung der 41. Versammlung deutscher Naturforscher und Aerzte zu Frankfurt a.M. am 23. September 1867." Braunschweig: Vieweg.

Dentel, Arno; Dietrich, Udo (2013): „Thermische Behaglichkeit – Komfort in Gebäuden". *Dokumentation Primero-Komfort*, Hamburg, HafenCity Universität, Institut für Energie und Gebäude. Berlin: Beuth Verlag. https://rom-umwelt-stiftung.de/wp-content/uploads/2006/02/Dokumentation_Thermische_Behaglichkeit.pdf

Die Bundesregierung (17.02.2025): „Diese Waffen und militärische Ausrüstung liefert Deutschland an die Ukraine". https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/lieferungen-ukraine-2054514. Abgerufen: 12.03.2025.

DIN EN ISO 7730:2006-05: „Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit".

Ebeling, Werner; Engel, Andreas; Feistel, Rainer (1990): *Physik der Evolutionsprozesse*. Berlin: Akademie-Verlag.

Ebeling, Werner; Feistel, Rainer (2017): „Selbstorganisation in Natur und Gesellschaft und Strategien zur Gestaltung der Zukunft". *Leibniz Online*, Nr. 28. http://leibnizsozietaet.de/category/publikationen/leibniz-online.

Ebeling, Werner; Feistel, Rainer; Haß, Ernst-Christoph; Plath, Peter (2023): „Zu Problemen der mechanisch – chemisch – elektrischen Energiewandlung und des Transports hochwertiger Energie im Kontext des Klimawandels". *Leibniz Online*, Nr. 50. https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2023/08/08_07_EbFeHaPl-LO2023.pdf

Ebeling, Werner; Orphal, Johannes (1990): „Rudolph Clausius in Berlin (1840–1855)". *Wiss. Zeitschrift der Humboldt-Universität zu Berlin, R. Math./Nat. Wiss.*, 39, 210–223.

FOCUS Online (06.03.2023): „Ukraine: Wie Kriegswaffen den Boden vergiften". https://www.focus.de/wissen/natur/wissen-umwelt-ueber-10-millionen-hektar-betroffen-wie-kriegswaffen-ukrainischen-boden-vergiften_id_187597547.html.
s. auch: Virgin, Julia (06.03.2023, zuletzt aktualisiert 21.02.2024): „Ukraine: Wie der Krieg die Umwelt vergiftet". DW, https://www.dw.com/de/ukraine-wie-der-krieg-die-umwelt-vergiftet/a-64872396.

Fortak, Heinz G. (1979): „Entropy and Climate". *Developments in Atmospheric Science*, 10, 1–14. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-41766-4.50008-4.

Fürthauer, Magdalena (02.05.2023): „USA geht wegen des Ukraine-Kriegs die Munition aus". *Frankfurter Rundschau*, https://www.fr.de/politik/selenskyj-news-ukraine-krieg-usa-nato-muntion-probleme-sorge-russland-putin-92245924.html.

Episkopos, Mark (03.02.2024): „Es gibt keine US-Zauberwaffe mehr für einen offensiven Sieg in der Ukraine". *Telepolis*, https://www.telepolis.de/features/Es-gibt-keine-US-Zauberwaffe-mehr-fuer-einen-offensiven-Sieg-in-der-Ukraine-9616878.html?seite=all.

Golovina, Nina I.; Titkov, Alexander Nikolayevich; Raevskii, Aleksander Vasilevich; Atovmyan, Lev Oganovich (1995): "CCDC 1319539: Experimental Crystal Structure Determination".
https://www.ccdc.cam.ac.uk/structures/Search?Ccdcid=1319539&DatabaseToSearch=Published
Associated Publications: Golovina, Nina I.; Titkov, Alexander Nikolayevich; Raevskii, Aleksander Vasilevich; Atovmyan, Lev Oganovich (1994): *Journal of Solid State Chemistry*, 113, 229–238. http://dx.doi.org/10.1006/jssc.1994.1365.

Habermas, Jürgen (1981): *Theorie des kommunikativen Handelns*, Band 1 und 2. Frankfurt am Main: Suhrkamp Verlag, 1. Auflage.

Helmholtz, Hermann von (1882): „Die Thermodynamik chemischer Vorgänge". *Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin – Erster Halbband*, 22.

Hollemann, Arnold Frederik; Wiberg, Egon (1964): *Lehrbuch der anorganischen Chemie*. Berlin: Walter de Gruyter & Co, 57–70. Auflage.

IfW – Institut für Weltwirtschaft Kiel (Update 05.12.2024): „Ukraine Support Tracker – Eine Datenbank für militärische, finanzielle und humanitäre Unterstützung der Ukraine". https://www.ifw-kiel.de/de/themendossiers/krieg-gegen-die-ukraine/ukraine-support-tracker/. Abgerufen: 13.01.2025.

Jaeger, Nils Ingo; Nowak, Ruth; Plath, Peter J.; Prüfer, Heinrich (1982): „Schwefel-Ablagerungen an Oberflächen von Zeolith-Einkristallen". *Beitr. elektronenmikroskop. Direktabb. Oberfl.*, 15, 319–324.

Kiel, Viola (20.02.2025): „Zeitbomben im Meer". *DIE ZEIT*, Nr. 8, 30–31. Siehe auch: *ZEIT ONLINE* (18.02.2025): „Zeitbombe im Meer". https://www.zeit.de/wissen/2025-02/munition-meer-ostsee-nordsee-zweiter-weltkrieg-saeuberung. Abgerufen: 26.03.2025.

de Klerk, Lennard (lead author, 2022, 2023): "Climate Damage Caused by Russia's War in Ukraine". https://climatefocus.com/wp-content/uploads/2023/12/20231201_ClimateDamageWarUkraine18monthsEN.pdf, Abgerufen: 14.03.2024.

Klapötke, Thomas M. (2009): *Chemie der hochenergetischen Materialien*. Berlin: De Gruyter, 1. Auflage.

Kotsch, Stefan (01.02.2024): „Munition der deutschen 120 mm Panzerkanone Rheinmetall". http://www.kotsch88.de/m_120_mm.htm.

Landau, Lew Davidowitsch; Lifschitz, Jewgeni Michailowitsch (1971): *Lehrbuch der Theoretischen Physik*. Bd. V: Statistische Physik, übersetzt von Gerhard Heber. Berlin: Akademie-Verlag, 3. Auflage, 179–186.

Lauth, Jakob „SciFox"/ Kowalczyk, Jürgen (2022): *Thermodynamik – Eine Einführung*. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.

Ledgard, Jared B. (2023): *Services Textbook of Explosives*. USA: Ordnance Technical Intelligence Agency.

Louis, Enrique; Guinea, Francisco; Flores, Francisco (1986): "The Fractal Nature of Facture". Fractals in Physics, hrsg. von Luciano Pietronero, Erio Tosatti. Amsterdam, Oxford, New York Tokyo: North-Holland Physics Publishing, 177–180.

Lumetsberger, Sandra (19.03.2023): „'Problem Nummer eins' Das Wettrennen zwischen Kiew und Moskau um den Munitionsnachschub". *Tagesspiegel*, https://www.tagesspiegel.de/internationales/problem-nummer-eins-das-wettrennen-zwischen-kiew-und-moskau-um-den-munitionsnachschub-9516884.html.

Ministère des Armées (2003): „Chemins de Mémoire – Spätfolgen für die Umwelt". https://www.cheminsdememoire.gouv.fr/de/spaetfolgen-fuer-die-umwelt.

Munroe, Charles E.; Howell, Spencer P. (1920): "Products of Detonation of TNT". *Proceedings of the American Philosophical Society*, 59.3, 194–223. Stable URL: https://www.jstor.org/stable/984499. Abgerufen: 22.02.2025.

ntv (02.02.2024): „Geschosse für Artillerie – Rheinmetall baut Munitionsfabrik in Niedersachsen". https://www.n-tv.de/wirtschaft/Rheinmetall-baut-Munitionsfabrik-in-Niedersachsen-article24708144.html

Planck, Max (1901): „Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum". *Ann. Physik*, 4, 553–563.

RedaktionsNetzwerk Deutschland (08.02.2023): „Bericht: Hoher Munitionsverbrauch in der Ukraine bringt Europas Rüstungsindustrie an ihre Grenzen". https://www.rnd.de/politik/ukraine-krieg-hoher-munitionsverbrauch-bringt-europas-ruestungskonzerne-an-ihre-grenzen-TS2KOKQ6MBCXTKIXJZLZTIH5OY.html.

Schwietering, Jürgen; Plath, Peter J. (06.1991): "Fractal Sound". Video zum Zerspringen von Zuckerkristallen.

Sonke, Jeroen E.; Koenig, Alkuin; Segur, Théo; Yakovenko, Nadiia (2025): "Global environmental plastic dispersal under OECD policy scenarios toward 2060". *Sci. Adv.*, 11.16. https://doi.org/10.1126/sciadv.adu2396.

SPIEGEL Ausland (23.01.2024): „155-Millimeter-Geschosse – NATO schließt milliardenschwere Verträge für Artilleriemunition ab“. https://www.spiegel.de/ausland/nato-schliesst-milliardenschwere-vertraege-fuer-artilleriemunition-ab-a-f4d9a4fb-f015-42dd-91b2-60a5e48a9650.

Statista (30.11.2023): „Die Länder mit den weltweit höchsten Militärausgaben im Jahr 2022“. https://de.statista.com/statistik/daten/studie/157935/umfrage/laender-mit-den-hoechsten-militaerausgaben/.

Statista (04.2024): „Ukraine: Militärausgaben von 2008 bis 2023 (absolut und relativ)“. https://de.statista.com/statistik/daten/studie/315946/umfrage/entwicklung-der-militaerausgaben-der-ukraine/.

Stefan, Josef (1879): „Über die Beziehung zwischen der Wärmestrahlung und der Temperatur“. *Sitzungsberichte der mathematisch-naturwissenschaftlichen Classe der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften*, 79, 391–428.

Tagesschau (12.11.2023): „Deutschland verdoppelt Militärhilfe für Ukraine“. https://www.tagesschau.de/ausland/europa/ukraine-krieg-deutschland-militaerhilfe-nato-100.html.

Tagesspiegel (18.07.2023): „Nach Waffenlieferungen an die Ukraine – Bundeswehr bestellt hunderttausende Artilleriegeschosse bei Rheinmetall.“. https://www.tagesspiegel.de/politik/nach-waffenlieferung-an-die-ukraine-bundeswehr-bestellt-hunderttausende-artilleriegeschosse-bei-rheinmetall-10165597.html

Turtur, Claus Wilhelm (2025): „Kühlaggregate, die mit Sonnenenergie betrieben werden“. https://www.ostfalia.de/cms/de/pws/turtur/klassische-projekte/kuehlaggregate/. Abgerufen: 23.01.2025.

Ullmann, Helmut; Bülow, Martin (2023): „Zur Rolle des Kohlendioxids für das Klima.“ https://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2023/08/08_Ullmann_Buelow_Bearbeitung_MK_Tabellenueberschrift_ft_rh.pdf

Umweltbundesamt (2025): „Luftschadstoffe – Staub“. https://www.umweltbundesamt.at/umweltthemen/luft/luftschadstoffe/staub. Abgerufen: 26.01.2025.

Wetzel, Hubert (20.03.2023): „Waffenlieferungen – Ein militärischer Pfennigartikel - eigentlich“. *Süddeutsche Zeitung*, https://www.sueddeutsche.de/politik/ukraine-artillerie-eu-1.5772327.

Wikibooks (30.05.2023): „Tabellensammlung Chemie / Stoffdaten Wasser“. Abgerufen: 18.01.2025, https://de.wikibooks.org/wiki/Tabellensammlung_Chemie/_Stoffdaten_Wasser

Wikipedia: „Boltzmann-Konstante“. Abgerufen: 27.01.2025, https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Boltzmann-Konstante&oldid=252234634 .

Wikipedia: „Detonationsgeschwindigkeit“. Abgerufen: 11.12.2023, https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Detonationsgeschwindigkeit&oldid=210362709.

Wikipedia: „Explosionswärme“. Abgerufen: 11.12.2023, https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Explosionsw%C3%A4rme&oldid=239188246.

Wikipedia: „Leopard 2“. Abgerufen: 14.01.2025, https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Leopard_2&oldid=252169689

Wikipedia: „M107 (Geschoss“. Abgerufen: 15.01.2025, https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=M107_(Geschoss)&oldid=249215667

Wikipedia: „M121 (Artilleriegeschoss“. Abgerufen: 15.01.2025, https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=DM121_(Artilleriegeschoss)&oldid=251621680

Wikipedia: „Nitroglycerin“. Abgerufen: 11.12.2023, https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Nitroglycerin&oldid=238643943.

Wikipedia: „Nuklearkatastrophe von Tschernobyl“. Abgerufen: 11.12.2023, https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Nuklearkatastrophe_von_Tschernobyl&oldid=239555635.

Wikipedia: „Oberflächenenergie“. Abgerufen: 26.01.2025, https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Oberfl%C3%A4chenenergie&oldid=250663134.

Wikipedia: „Panzerhaubitze 2000“. Abgerufen: 15.01.2025, https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Panzerhaubitze_2000&oldid=252232937.

Wikipedia: „Schlagempfindlichkeit“. Abgerufen: 11.12.2023, https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Schlagempfindlichkeit&oldid=209710127.

Wikipedia: „Sekundärsprengstoff“. Abgerufen: 11.12.2023, https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Sekund%C3%A4rsprengstoff&oldid=228479097.

Wikipedia: „Strahlungsaustausch“. Abgerufen: 03.04.2025, https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Strahlungsaustausch&oldid=250633743.

Wikipedia: „Stoßwelle“. Abgerufen: 20.02.2025, https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Sto%C3%9Fwelle&oldid=253435619.

Wikipedia: „Taurus (Marschflugkörper)“. Abgerufen: 17.03.2025, https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Taurus_(Marschflugk%C3%B6rper)&oldid=253948936.

Wikipedia: „Trinitrotoluol“. Abgerufen: 11.12.2023, https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Trinitrotoluol&oldid=239495932.

Wikipedia: „TNT-Äquivalent“. Abgerufen: 11.12.2023, https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=TNT-%C3%84quivalent&oldid=232544137.

Wikipedia: „Ultrafeinstaub“. Abgerufen: 01.02.2025, https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Ultrafeinstaub&oldid=246143636.

Wikipedia: „Zerstörung des Kachowka-Staudamms“. Abgerufen: 10.02.2025, https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Zerst%C3%B6rung_des_Kachowka-Staudamms&oldid=252899501.

World Health Organization (2021): “WHO global air quality guidelines”. Abgerufen: 31.01.2025, https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228-eng.pdf.

Wüthrich, Kaspar (2003): „Physik der Explosion“. *Chimia*, 57, 757–765.

ZDFheute (08.03.2023): „EU-Unterstützung für die Ukraine – Munitionsmangel kriegsentscheidend?“. https://www.zdf.de/nachrichten/zdfheute-live/munition-mangel-eu-ukraine-krieg-video-100.html.

E-Mail-Adressen der Verfasser: peter_plath@t-online.de, ernst-christoph.hass@web.de

Leibniz Online, Nr. 56 (2025)

Zeitschrift der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin e. V.
ISSN 1863-3285 • DOI: 10.53201/LEIBNIZONLINE56

Erinnerungen an Heinz-Jürgen Rothe: zwischen Arbeits- und Allgemeiner Psychologie. Ein Gedächtnisprotokoll[1]

Werner Krause
(MLS, Jena)

Veröffentlicht: 20. Juni 2025

Abstract

The article shows how problems in industrial psychology can be solved by transferring methods and theories from general psychology.

Zusammenfassung

Der Beitrag zeigt, wie durch Übertragung von Methoden und Theorien der Allgemeinen Psychologie Probleme der Arbeitspsychologie gelöst werden können.

Keywords/Schlüsselwörter

Memorial Colloquium Heinz-Jürgen Rothe, industrial psychology, general psychology, cognitive theory / Erinnerungskolloquium Heinz-Jürgen Rothe, Arbeitspsychologie, Allgemeine Psychologie, kognitive Theorie.

Sehr verehrte Frau Präsidentin, liebe Anna-Marie, lieber Herr Pfaff, liebe Kollegen,

In meinem Lateinlehrbuch der 11. Klasse war ein Bild mit einem alten römischen Grabstein, auf dem stand:

„Non nobis solum nati sumus.“ Wir sind nicht für uns allein geboren.

Diesen Spruch hätte ich Jürgen gern „nachgerufen“, denn so war er: stets für andere da, dabei „geräuschlos“. Man merkte es erst, wenn er nicht da war.

Am 2. Februar 2012 hielt Jürgen Rothe seine Abschiedsvorlesung hier an der Universität Potsdam. Ich empfand diese Rede als eine Antrittsvorlesung, als ein Programm für die nächste Zeit.

Die Abbildung 25 dieser seiner Power Point Präsentation, die mir Anna-Marie Metz freundlicherweise zur Verfügung gestellt hat, befasst sich mit Schlussfolgerungen und theoretischen Grundlagen. Auf der Abbildung 30 dieser Präsentation schreibt er: „Verbindungen zur Kognitionspsychologie sollten (wieder) stärker geknüpft werden.“

Nun könnte man meinen, dieses sein Credo für eine Elementaranalyse menschlicher Informationsverarbeitung für die Arbeitspsychologie – also für eine Theorie – könnte vorzugsweise durch seine *Nähe* zur Allgemeinen Psychologie bedingt sein, zumal seine frühen Arbeiten dies unterstreichen. Er hatte sich damals zusammen mit Jochen Hoffmann z.B. mit der besseren Strukturierung von Bedienungsanleitungen von Rechnern vor dem

[1] Überarbeitete Fassung des Vortrages anlässlich des Erinnerungskolloquiums für Heinz-Jürgen Rothe am 20. Februar 2025 in Potsdam.

Hintergrund eines Propositionalgraphen nach Kintsch und van Dijk (1978) befasst. Das gleiche gilt für die Entwicklung von Kommandosprachen vor dem Hintergrund der Stelligkeit (Valenz) semantischer Relationen. Aber nach meinem Dafürhalten ist sein Credo für mehr theoretische Grundlagen in der Analyse des Faches selbst zu suchen, in den *Herausforderungen, denen sich beide Gebiete, die Arbeitspsychologie und die Allgemeine Psychologie* gegenübersahen. Von einer Theorie verlangt man die Vorausberechnung. Wie stand es damals darum und wie ging es weiter?

Zusammen mit Rosemarie Seifert hat er sich an der Humboldt-Universität im Bereich Ingenieurpsychologie, den Klaus-Peter Timpe geleitet hat, mit Diagnosealgorithmen beschäftigt. Diagnosealgorithmen sind bekanntlich Entscheidungsstrukturen, für die aus Sicht des Nutzers die Frage wichtig ist, wie viele Ebenen im Gedächtnis (ohne zusätzliche Hilfsmittel) verarbeitet werden können. Diese Frage konnte so gezielt von der Allgemeinen Psychologie *nicht* begründet beantwortet werden. Natürlich gab es ausgezeichnete Untersuchungen in dieser Richtung in der Allgemeinen Psychologie. Ich denke hier an die „Bestimmung einer subjektiven Metrik und deren Veränderung im Denkprozess" von Hubert Sydow (1970). Er hatte gezeigt, wie sich die Weite des gedanklichen Vorausspiels in Abhängigkeit vom Weg im Problemraum und vom Lernzustand verändert und wie sich die subjektive Metrik der objektiven im Denkprozess anpasst, aber auf gedächtnispsychologische Fragen ließen sich die Befunde *nicht verallgemeinernd* übertragen.

Ähnliches gilt auch für die Befunde zu Kommunikationsstruktur und Leistung in der Arbeits- und der Allgemeinen Psychologie. Sie stehen nebeneinander, aber das eine lässt sich aus dem anderen nicht vorhersagen, weil theoretische Verallgemeinerungen, oder besser die Entwicklung einer Theorie, bisher nicht gelungen sind.

Ich denke hier an die ausgezeichnete Untersuchung von Jürgen Neubert und Rolf Tomczyk (1986) über den Einfluss der Kommunikationsstruktur in der Fertigung auf die Effektivität in der Produktion, also eine arbeitspsychologische Studie. Sie hatten gezeigt: Kreisstruktur (Nestfertigung) vor Längsstruktur (Fließbandfertigung), weil die Kreisstruktur den Dialog, also die wechselseitige Rückmeldung zwischen Beginn und Ende des Produktionsvorganges fördert, die Längsstruktur diese unmittelbare Rückmeldung nicht erlaubt.

Wilfried Gundlach und Gisela Schulz (1970, 1987) haben in einer allgemeinpsychologischen Studie in überzeugender Weise gezeigt, dass lange Vorschlags-Bewertungsketten im Dialog (und nicht im Monolog) vor der Handlungsentscheidung zu einer deutlich besseren Problemlöseleistung führen. Die Gemeinsamkeiten beider Studien sind offensichtlich: die Kommunikationsstruktur beeinflusst die nachfolgende Leistung. Aber es ist nicht möglich, das eine aus dem anderen vorherzusagen, weil wir keine Theorie über die Beziehungen zwischen Kommunikationsstruktur und Leistung haben, die eine Vorhersage erlaubt (wie das in den Naturwissenschaften üblich ist).

Bei aller Hochachtung vor der Güte und Ausstrahlungskraft der Einzelarbeiten in den jeweiligen Disziplinen mag seine Unzufriedenheit über eine mangelnde Verallgemeinerung von Befunden aus der Allgemeinen Psychologie zum Zweck einer besseren Vorhersage in der Arbeitspsychologie den Ausschlag gegeben haben für sein Credo: Wir brauchen eine Theorie.

Bei dieser Einschätzung habe ich mich bisher auf Arbeiten in unserem „Umkreis" bezogen. Betrachten wir die Entwicklung an Beispielen außerhalb unseres Umkreises, dann führt dies m.E. zur weiteren Bekräftigung und Bestätigung seines Postulates: Wir brauchen eine Theorie.

Um das zu beleuchten, möchte ich Problembewältigungen in der Arbeitspsychologie ansprechen, die in ihren Lösungen eng mit Methoden und Erkenntnissen der Allgemeinen Psychologie verknüpft waren, an denen Jürgen Rothe aber *nich*t beteiligt war.

Übertragung von Methoden:
Blickbewegungsmessungen bei der visuellen Kontrolle von Bildröhren.
Eine Untersuchung an der RWTH Aachen[2]

Die Firma Philips/Eindhoven hatte – dem Kundenwunsch folgend – ihre Produktion von kleinen Fernsehbildröhren (z.B. Durchmesser 37 Zoll) auf größere Bildröhren (z.B. 42 Zoll) umgestellt. Zum gleichen Zeitpunkt erhöhte sich die Anzahl der Reklamationen beträchtlich: die Fernsehbildröhren wiesen gehäuft Fehler (Inhomogenitäten bei der Beschichtung) auf, die von den Kollegen in der Endkontrolle übersehen wurden. Die Firma berichtete von einem jährlichen Verlust von 8 bis 10 Millionen DM. Das geht aus einem Bericht von Dieter Heller zum Philips - Projekt vom 5.12.2001 hervor (Heller 2001a). Die Ingenieure der Firma konnten die Ursache für die Erhöhung der Reklamationen nicht finden und wandten sich an Dieter Heller, der zu diesem Zeitpunkt den Lehrstuhl für Arbeitspsychologie innehatte. Zunächst wurden die klassischen Parameter wie z.B. Krankenstand, Konflikte etc. in der Gruppe der Endkontrolleure untersucht. Man fand keinen Zusammenhang. Dieter Heller, der zuvor den Lehrstuhl für Allgemeine Psychologie in Fribourg vertretungsweise innehatte und viel Erfahrung mit Blickbewegungsmessungen im Rahmen der Leseforschung besaß, empfahl die Elementaranalyse des Informationsaufnahmeprozesses beim Kontrollieren der Fernsehbildröhren mittels Blickbewegungen. Im Ergebnis zeigte sich, dass die Blickbewegung sich nur auf die Fläche der kleineren Bildröhren bezog, ein Teil der Fläche der größeren Bildröhren also gar nicht abgetastet wurde. Diese Einengung der Blickbewegung war möglicherweise durch den hohen Automatisierungsgrad bedingt, denn in sechs Monaten mussten ca. 40.000 Bildröhren geprüft werden.

Nach erfolgter Umgestaltung, indem ein Raster über das Blickfeld gelegt wurde, konnte erreicht werden, dass die gesamte Fläche abgetastet wurde. Die Reklamationen gingen auf die normale Anzahl zurück. Es ist offensichtlich, *durch Vorausberechnung des Verhaltens* – sei es durch eine Theorie oder Simulation – hätte die Firma viel Geld sparen können.

Übertragung von Problemen:
Von der Allgemeinen in die Arbeits– bzw. Verkehrspsychologie.
Eine Untersuchung an der Universität Würzburg und der RWTH Aachen

Die Verkehrspolizei Hamburg stellte nach Fertigstellung des Hamburger Elbtunnels fest, dass die Anzahl der Auffahrunfälle am Eingang der Tunnelröhren signifikant höher war als an anderen Messpunkten. Sie wandten sich an den Verkehrspsychologen Hans-Peter Krüger, der ihnen durch seine Zusammenarbeit mit BMW in Sachen Fahrer-Assistenz-Systeme bekannt war. Zugleich war Hans-Peter Krüger als Methodiker am Lehrstuhl Allgemeine Psychologie von Otto Heller in die dort übliche Forschung zur Wahrnehmung und Signalerkennung eingebunden. Hans-Peter Krüger nahm sich – zusammen mit Dieter Heller (Heller 2001b) von der RWTH Aachen – dieses Problems an. Sie stellten fest, dass der Fahrer beim Einfahren in den Elbtunnel senkrechte Leuchtlinien wahrnimmt, die sich nach hinten verdichten: eine klassische Situation der

[2] Annelies Heinisch-Heller danke ich für die Überlassung zweier unveröffentlichter Manuskripte zum Philips-Projekt und zum Elbtunnel-Projekt aus dem Nachlass von Dieter Heller.

Raumwahrnehmung (Klix 1962). Der Fahrer erlebt einen Tiefeneindruck, der zum Bremsen führt. Da für den nachfolgenden Verkehr diese Szene nicht (bzw. noch nicht) wahrnehmbar ist, gibt es für nachfolgende Fahrzeuge keinen Grund zum vorausschauenden Bremsen und es kommt zum Auffahrunfall. *Mit der Auffassung des Verkehrsproblems als ein Problem der Raumwahrnehmung bietet sich auch die Lösung an:* Die senkrechten Leuchtlinien wurden durch die Struktur der Kacheln und durch die Tunnelbeleuchtung erzeugt. Die strukturierten Kacheln wurden durch glatte Kacheln ersetzt. Die Beleuchtung wurde geändert. Über die Mehrkosten ist nichts bekannt. Die Auffahrunfälle normalisierten sich wieder. Eine Vorausberechnung des Verhaltens in einer so simulierten Umgebung hätte den Tunnelumbau erspart.

Anwendung einer Theorie:
Signalerkennungstheorie bei Röntgenärzten der Charité.
Eine Untersuchung an der TU Ilmenau

In den frühen 1950er Jahren haben Ingenieure und Psychologen die Signalerkennungstheorie entwickelt, um den Prozess der Erkennung von Signalen von dem der Antwortentscheidung bei der Radarüberwachung zu trennen und zu optimieren (Swets 1964). Die Theorie erlaubt bekanntlich die Bestimmung zweier Parameter, der sensorischen Leistungskapazität und der Reaktionsneigung aus ein und demselben Antwortverhalten. Die sensorische Leistungskapazität steht für die Informationsaufnahme, die Reaktionsneigung für das Risikoverhalten beim Entscheiden. Aus dem Antwortverhalten kann nun bestimmt werden, inwieweit die so bestimmten experimentellen Parameter von aus der Theorie bestimmten optimalen Parametern abweichen (Maximierung der sensorischen Leistungskapazität und Optimierung der Reaktionsneigung). Weicht die experimentell bestimmte sensorische Leistungskapazität von der maximalen sensorischen Leistungskapazität ab, muss die Informationsaufnahme verbessert werden. Weicht die experimentell bestimmte Reaktionsneigung von der optimalen ab, muss das Entscheidungsverhalten trainiert werden.

Die Theorie erlaubt also, Fehlverhaltensweisen auf ihre unterschiedlichen Komponenten zurückzuführen und getrennt zu kompensieren.

Mitarbeiter der TU Ilmenau (damals in den sechziger Jahren Hochschule für Elektrotechnik) führten Untersuchungen an Röntgenärzten der Charité durch. Nach Registrierung des Antwortverhaltens konnte für jeden Röntgenarzt entschieden werden, ob die sensorische Leistungskapazität von der maximalen abweicht. Die Konsequenz wäre eine bessere Gestaltung der Informationsaufnahme.

Aus dem Antwortverhalten wurde auch der aktuelle Wert für das Risikoverhalten (Parameter Reaktionsneigung) bestimmt und mit dem optimalen Wert verglichen. Daraus folgte eine Entscheidung, ob ein Training des Entscheidungsprozesses erfolgen musste oder nicht. Auch ein Trainingserfolg war so bestimmbar. Mit Hilfe der ROC-Diagramme (reciever operation characteristic-curves) ließ sich das Verhalten jedes einzelnen Arztes auch sehr gut darstellen. In Velden (1982) finden sich zahlreiche Beispiele.

Diese Beispiele sollten nur demonstrieren, dass das Credo der Abschiedsvorlesung von Heinz-Jürgen Rothe: *wir brauchen eine Theorie*, die sich aus den praktischen Anforderungen ergab.

Um auf den Ausgangspunkt, seine Abschiedsvorlesung 2012, zurückzukommen: am Ende der Berufstätigkeit erwartet man eine Bilanz: was ist neu auf den Tisch gelegt worden. Aber er hat viel mehr getan. Jürgen hat mit seinem Credo für eine Theorie *den Kurs abgesteckt*, natürlich in der ihm eigenen „leisen Art“. Aber wer es hören wollte, der konnte es hören.

Bibliographie

Gundlach, Wilfried / Schulz, Gisela (1970): „Über einen Ansatz zur Untersuchung des kognitiven Leistungsverhaltens von Gruppen". *Die Struktur des Kollektivs in sozialpsychologischer Sicht,* hrsg. Manfred Vorweg. Berlin: Deutscher Verlag der Wissenschaften.

Gundlach, Wilfried / Schulz, Gisela (1987): „Ist die Effektivität von Problemlösungen aus Diskussionen voraussagbar?" *Psychologie für die Praxis* 4, 350–368.

Heller, Dieter (2001a): *Manuskript Philips-Projekt*, unveröffentlicht.

Heller, Dieter (2001b): *Manuskript Elbtunnelprojekt*, unveröffentlicht.

Kintsch, Walter / van Dijk, Teun A. (1978): "Toward a model of text comprehension and production". *Psychological Review* 85*,* 363–394.

Klix, Friedhart (1962): *Elementaranalysen zur Psychophysik der Raumwahrnehmung*. Berlin: Deutscher Verlag der Wissenschaften.

Klix, Friedhart (1971): *Information und Verhalten*. Berlin: Deutscher Verlag der Wissenschaften.

Neubert, Jürgen / Tomczyk, Rolf (1986): *Gruppenverfahren der Arbeitsanalyse und Arbeitsgestaltung*. Berlin: Springer.

Rothe, Heinz-Jürgen (2012): Power Point Präsentation seiner Abschiedsvorlesung am 2.2.2012.

Swets, John A. (1964): *Signal Detection and Recognition by Human Observers*. New York: Wiley.

Sydow, Hubert (1970): „Zur metrischen Erfassung von subjektiven Problemzuständen und zu deren Veränderung im Denkprozess II". *Zeitschrift für Psychologie*, 178*,* 1–50.

Velden, Manfred (1982): *Die Signalentdeckungstheorie in der Psychologie*. Stuttgart: Kohlhammer.

E-Mail-Adresse des Verfassers: urwe.krause@t-online.de