



> Technikwissenschaften

Erkennen – Gestalten – Verantworten

acatech (Hrsg.)

acatech IMPULS

Februar 2013

Herausgeber:

acatech – DEUTSCHE AKADEMIE DER TECHNIKWISSENSCHAFTEN, 2013

Geschäftsstelle
Residenz München
Hofgartenstraße 2
80539 München

Hauptstadtbüro
Unter den Linden 14
10117 Berlin

Brüssel-Büro
Rue du Commerce/Handelsstraat 31
1000 Brüssel
Belgien

T +49 (0) 89 / 5 20 30 90
F +49 (0) 89 / 5 20 30 99

T +49 (0) 30 / 2 06 30 96 10
F +49 (0) 30 / 2 06 30 96 11

T + 32 (0) 2 / 5 04 60 60
F + 32 (0) 2 / 5 04 60 69

E-Mail: info@acatech.de
Internet: www.acatech.de

Koordination: Dr. Ulrich Glotzbach, Samia Salem

Redaktion: Prof. Dr. Klaus Kornwachs, Linda Treugut

Layout-Konzeption: acatech

Konvertierung und Satz: Fraunhofer-Institut für Intelligente Analyse- und Informationssysteme IAIS,
Sankt Augustin

Die Originalfassung der Publikation ist verfügbar auf www.springer.com

> DIE REIHE acatech IMPULS

In dieser acatech Reihe erscheinen Analysen und Denkanstöße zu Grundfragen der Technikwissenschaften sowie der wissenschaftsbasierten Politik und Gesellschaftsberatung. Die Impulse werden von acatech Mitgliedern und weiteren Experten erarbeitet und vom acatech Präsidium autorisiert und herausgegeben.

> INHALT

VORWORT	7
KURZFASSUNG	8
PROJEKT	10
1 EINLEITUNG	12
2 VOM INGENIEURWESEN ZU DEN TECHNIKWISSENSCHAFTEN	15
3 DIE TECHNIKWISSENSCHAFTEN UND IHR ORT IN DEN WISSENSCHAFTEN	17
3.1 Wissenschaften	17
3.2 Spezifika der Technikwissenschaften	18
4 ERKENNEN IN DEN TECHNIKWISSENSCHAFTEN	21
4.1 Theoretisches und empirisches Wissen in den Technikwissenschaften	21
4.2 Modellbildung	23
4.3 Experiment und Test	27
5 GESTALTEN IN DEN TECHNIKWISSENSCHAFTEN	30
5.1 Technikwissenschaften und technische Praxis	30
5.2 Prognosen – Methoden – Grenzen	33
6 VERANTWORTUNG	34
6.1 Verantwortung in den Technikwissenschaften	34
6.2 Verantwortung in der Technik	37
WEITERFÜHRENDE LITERATUR	40

VORWORT

Was sind die Technikwissenschaften? Was sind ihre Charakteristika und wodurch lassen sie sich von anderen Wissenschaften unterscheiden? Wie sind die Technikwissenschaften entstanden und welche Rolle spielen Technik und Technikwissenschaften in der Gesellschaft? Für uns als Deutsche Akademie der Technikwissenschaften sind diese Fragen von zentraler Bedeutung. Im Rahmen des Themennetzwerks „Grundfragen der Technikwissenschaften“ vermittelt acatech Impulse über die Disziplinengrenzen von Wissenschaftstheorie, Technikphilosophie, Techniksoziologie, Technikgeschichte, Wirtschafts- und Technikwissenschaften hinweg.

Ungeachtet ihrer gesellschaftlichen Bedeutung sind die Technikwissenschaften bislang von der traditionellen Wissenschaftsforschung weitgehend vernachlässigt worden. Wissenschaften sollten zweckfrei sein, so die lange vorherrschende Vorstellung. Diesem Bild entsprechen die Technikwissenschaften nicht. Sie selbst haben bisher eher spärlich über ihre Grundlagen und Grundfragen reflektiert.

acatech berät Gesellschaft und Politik in technikwissenschaftlichen Zukunftsfragen. Um dies leisten zu können, müssen wir uns auch mit unserer eigenen Disziplin auseinandersetzen. Deshalb hat acatech eine Arbeitsgruppe eingesetzt, die von Oktober 2010 bis Sommer 2012 den vorliegenden acatech IMPULS erarbeitet hat. Er soll einen Anstoß geben, die Technikwissenschaften als Wissenssystem innerhalb und außerhalb von acatech zu thematisieren. Bewusst haben sich die Autoren auf die Frage der fachlichen Ausrichtung der Technikwissenschaften, der Methodik und der Wirksamkeit für die gesellschaftliche

Diskussion um Technik und Innovation fokussiert. Die ebenfalls bedeutsamen Aspekte der Geschichte der Technikwissenschaften, der institutionellen Ausprägungen und Organisationsformen sowie der Abgrenzung zwischen Ingenieur- und Technikwissenschaften wurden bewusst ausgeklammert. Es ist uns bewusst, dass in den Technikwissenschaften – wie auch in jeder anderen Wissenschaft – Forschung und Lehre aufs Engste miteinander verknüpft sind. Für die Technikwissenschaften spielt diese Verknüpfung wegen des starken Bezugs zu Anwendung und Praxis eine ganz besondere Rolle, der jedoch in diesem IMPULS noch nicht nachgegangen werden konnte. Der Schwerpunkt liegt auf den beiden Fragen: Was sind und was wollen die Technikwissenschaften? Und: Was können wir von ihnen erwarten? Mit diesem IMPULS-Papier wollen wir das Selbstverständnis der Technikwissenschaften schärfen und Vertretern anderer Wissenschaften den Zugang zu den Technikwissenschaften erleichtern.

Dieser Leitfaden erscheint als zweiter Band unserer neuen Publikationsreihe „acatech IMPULS“. Die Publikationen dieser Reihe enthalten Analysen und Denkanstöße zu Grundfragen der Technikwissenschaften sowie der wissenschaftsbasierten Politik- und Gesellschaftsberatung. Sie richten sich an alle, die in den Technikwissenschaften oder der Politikberatung tätig sind oder sich mit der Reflexion über die Technikwissenschaften und ihre Rolle in der Gesellschaft beschäftigen.

acatech dankt der Projektgruppe für ihr ausgesprochenes Engagement sowie allen Mitwirkenden für die Diskussion und Mitarbeit an diesem IMPULS.



Prof. Dr. Dr. h.c. Reinhard Hüttel
acatech Präsident



Prof. Dr. Henning Kagermann
acatech Präsident

KURZFASSUNG

Technische Gestalter gibt es seit Menschengedenken. Was die zeitgenössische Ingenieurarbeit jedoch von ihren historischen Vorläufern unterscheidet, ist, dass Ingenieure seit dem 18. Jahrhundert begonnen haben, ihre Tätigkeit zu verwissenschaftlichen und damit auf ein objektives, überprüfbares und verallgemeinerbares Fundament zu stellen. Darin standen Ingenieure nicht allein. Sie lieferten neben Natur- und Geisteswissenschaftlern, Ökonomen, Verwaltern und Ärzten ihren originären Beitrag zur wissenschaftlichen Durchdringung der Welt, indem sie ihr eigenes Handeln wissenschaftlichen Kriterien unterwarfen und dadurch sowohl mehr Sicherheit als auch höhere Produktivität erreichten. Bis weit in das 20. Jahrhundert hinein waren all dies Tätigkeiten, die von Männern dominiert wurden. Erst in der jüngsten Vergangenheit brechen hier die Geschlechterbarrieren auf. Gleichwohl trifft es überwiegend immer noch die Realität, wenn wir in diesem Text zugunsten der Lesbarkeit meist von dem Ingenieur sprechen, wenngleich für die Zukunft ein ausgeglicheneres Geschlechterverhältnis erstrebenswert ist.

Was sind Technikwissenschaften?

Bei den Technikwissenschaften handelt es sich um eine eigenständige Wissenschaftsgruppe, die sich hinsichtlich ihres Gegenstands, ihrer Ziele, Methoden und Institutionen von den anderen Wissenschaften unterscheidet. Der Gegenstand der Technikwissenschaften ist die Technik, verstanden als künstliche, zweckgerichtete und materielle sowie immaterielle Elemente besitzende Objekte und Prozesse. Technikwissenschaften untersuchen die Technik hinsichtlich ihrer Struktur und Funktion, ihrer Folgen für Umwelt und Mitwelt sowie ihrer soziokulturellen Entstehungs- und Verwendungszusammenhänge. Dabei geht es um den gesamten Lebenszyklus der Technik, das heißt um deren Konzeption, Herstellung, Verwendung und Entsorgung bzw. Recycling.

Das Ziel der Technikwissenschaften besteht in der Erzeugung von Gesetzes-, Struktur- und Regelwissen über Technik – in der Absicht, dieses in technischen Anwendungen zu

nutzen. Die Methoden der Technikwissenschaften zeichnen sich durch eine zielorientierte Vielfalt aus, die von rational-systematischen bis zu intuitiv-heuristischen Methoden reicht. Das bedeutet freilich auch, dass die Technikwissenschaften sich am tatsächlich Machbaren und nicht am bloß Denkbaren orientieren. Die Technikwissenschaften bleiben nicht bei der Technikanalyse stehen, sondern entwickeln Methoden der Synthese für die Gestaltung des Neuen. Sie antizipieren die spätere Anwendung des Wissens über Technik und ihre Wechselwirkungen mit dem Umfeld, was zur Integration ökologischer, wirtschaftlicher, kultureller und sozialer Überlegungen in technikwissenschaftliche Modelle führt. Dazu werden Technikwissenschaften sowohl innerhalb wie außerhalb von Universitäten betrieben. Die Technikwissenschaften umfassen letztlich alles wissenschaftlich fundierte Wissen, das wir über das Hervorbringen und Verwenden von Technik, deren kognitive und praktische Voraussetzungen sowie deren Folgen für Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft haben.

In einem Satz lassen sich die Technikwissenschaften wie folgt zusammenfassen:

Technikwissenschaften schaffen kognitive Voraussetzungen für Innovation in der Technik und Anwendung technischen Wissens und legen die Grundlagen für die Reflexion ihrer Implikationen und Folgen.

Die wichtigsten und für die Verwissenschaftlichung der Technik spezifischen intellektuellen Werkzeuge sind Abstraktion und Modellbildung, welche soweit möglich durch Experimente und Tests überprüft werden. Letzteres ist jedoch nicht immer möglich, da Anlagen als Ganzes ab einer bestimmten Größenordnung und Komplexität vor ihrem Einsatz nicht in einem Labor untergebracht werden können. Sofern ein materieller Test unmöglich ist (so auch aus ökonomischen, sicherheitstechnischen oder ethischen Gründen), tritt an seine Stelle die Modellbildung und anschließende Simulation.

Technische Konkretion und wissenschaftliche Abstraktion ergänzen sich: Abstraktion verbindet das noch unbekannte Neue mit dem bereits Bekannten und wissenschaftlich Erforschten. Die Abstraktion in den Technikwissenschaften fördert so die pragmatische Problemlösung in der Ingenieurpraxis. Modellbildung erlaubt das theoretisch und empirisch begründete Abschätzen des Verhaltens des Neuen in der Anwendung. Mit den Modellen gelingt es, wesentliche Verhaltensweisen der Systeme zu erkennen, zu bewerten und durch geeigneten Entwurf zu steuern.

Die technikwissenschaftlichen Modelle müssen ein hohes Maß an Ganzheitlichkeit und Komplexität bewahren, sodass die Anwendungsqualität der Ergebnisse nicht beeinträchtigt wird. Gleichzeitig verbleibt in den Technikwissenschaften wie auch in der Technik im Allgemeinen ein Bereich der Vermutungen und der nicht in aller Tiefe erhärteten Sachverhalte, was sie zwangsläufig anfällig für Unsicherheiten in den daraus ableitbaren Aussagen macht. Der unvermeidliche Umgang mit unvollständigen stochastischen Modellen ist eine der großen Herausforderungen in der Praxis des Ingenieurwesens.

Das Zusammenspiel von Erfahrung und Gestaltung sowie Systematisierung und Forschung macht die Modellbildung in den Technikwissenschaften letztlich zu einer Kunst. Die zielorientierte Abstraktion ist für eine erfolgreiche Modellbildung unabdingbar. In diesem Bereich der Gestaltung liegt auch der besondere Ort der Kreativität.

Verantwortung in Technikwissenschaft und Technik

Technik ist immer ambivalent. Die Planung und Ausführung von Ingenieurprojekten stehen vor der ständigen Herausforderung, den gewünschten Nutzen ohne unvermeidbare schädliche Nebenwirkungen zu erzielen. Die schwierige Abwägung zwischen Nutzen und Schaden nach Kriterien, welche die Gesellschaft vorgibt, ersetzt zwangsläufig die einfache, aber in der Praxis meist unlösbare Forderung nach Nutzen ohne Schaden. Dies

erfordert den permanenten gesellschaftlichen Diskurs über die Ziele und Folgen der Technik. Sich wandelnde Ressourcenverfügbarkeit, vor allem aber deren Neubewertung sowie die Neubewertung der Verletzlichkeit der verfügbaren Ressourcen verlangen ständig nach technischen Neuerungen. Ebenso drängen veränderte und sich angesichts der wachsenden technischen Potenziale erweiternde gesellschaftliche Bedürfnisse auf einen unablässigen Strom neuer technischer Lösungen.

Ganz ohne Zweifel hatte die Verwissenschaftlichung der Technik den größten Anteil an der Potenzierung der gestalterischen Möglichkeiten wie auch an der Steigerung der Sicherheit technischer Produkte und Prozesse in der jüngeren Vergangenheit. Sie ist das wirkmächtigste Instrument, das den heutigen Ingenieuren zu Gebote steht. Sie bleibt jedoch trotz aller Anstrengung notwendigerweise unvollkommen und kann nicht frei von Irrtümern sein. Dies ist bei der Gestaltung von Technik stets mitzudenken. Die wissenschaftlichen Aussagen der Technik immer wieder zu überprüfen, ist die Grundverantwortung jedes Wissenschaftlers, aber ganz besonders des Ingenieurs. Er trägt eine herausgehobene Verantwortung für das Gedeihen unserer technischen Welt und für ihre Sicherheit bei aller unvermeidbaren Unvollkommenheit. Zugleich hat er gerade aufgrund seiner fachlichen Kompetenz gegenüber der Gesellschaft die Verpflichtung, erkannte Unwägbarkeiten und weiterhin bestehende Unsicherheiten zu kommunizieren und frühzeitig darauf hinzuweisen, wann und wo ein gesellschaftlicher Klärungsbedarf besteht bzw. bei künftig möglicher Technik entstehen könnte. Die Verantwortung der Technikwissenschaftler und Ingenieure ist damit nicht nur eine Verantwortung für das bestmögliche Funktionieren einer menschenfreundlichen Technik, für den sparsamen und schonenden Umgang mit den natürlichen Ressourcen. Sie ist ebenso eine Verantwortung für das Aufzeigen von denkbaren und machbaren Alternativen in der künftigen Gestaltung unserer technisierten Welt. Technikwissenschaftler und Ingenieure müssen die Zukunft offen halten.

PROJEKT

> PROJEKTLEITUNG

Prof. Dr. phil. habil. Dipl.-Phys. Klaus Kornwachs
vorm. Brandenburgische Technische Universität Cottbus,
Universität Ulm/acatech

> PROJEKTGRUPPE

- Prof. Dr.-Ing. habil. Wilhelm Dangelmaier, Universität Paderborn/acatech
- Prof. Dr.-Ing. Bernd-Robert Höhn, Technische Universität München/acatech
- Prof. Dr. phil. Wolfgang König, Technische Universität Berlin/acatech
- Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann, Technische Universität München/acatech
- Prof. Dr. phil. Ulrich Wengenroth, Technische Universität München/acatech
- Prof. em. Dr. Dr. h. c. mult. Peter Jan Pahl, Technische Universität Berlin/acatech
- Prof. Dr. phil. Hans Poser, Technische Universität Berlin

> REVIEWER

- Prof. Dr. Dr. h. c. Ortwin Renn (Review-Leitung), Universität Stuttgart/acatech Präsidium
- Prof. Dr. Klaus Mainzer, Technische Universität München
- Prof. Dr. Dr. h. c. mult. Dr.-Ing. E. h. Jürgen Mittelstrass, Universität Konstanz/acatech
- Prof. Dr.-Ing. Ernst Schmachtenberg, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen/acatech
- Prof. em. Dr. h. c. mult. Dr.-Ing. E. h. mult. Dr.-Ing. Günter Spur, Technische Universität Berlin/acatech

> WEITERE BETEILIGTE

Folgende Personen haben mit Kommentaren zum Text beigetragen:

- Prof. Dr. Dr. h. c. Klaus Brockhoff
- Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Heinz Duddeck
- Prof. em. Dr.sc. techn. Dr. h. c. mult. Dr.-Ing. E. h. Alfred Fettweis
- Prof. Dr. Armin Grunwald
- Prof. Dr. rer. nat. habil. Manfred Hennecke
- Prof. Dr.-Ing. Ellen Ivers-Tiffée
- Dr.-Ing. Ulrich Wilhelm Jaroni
- Prof. em. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Franz Mayinger
- Prof. Dr. Dr. h. c. mult. Dr.-Ing. E. h. Jürgen Mittelstrass
- Prof. em. Dr. Dipl.-Geo. Jörg F. W. Negendank
- Prof. em. Dr. Wulff Plinke
- Prof. Dr.-Ing. Günter Ropohl
- Prof. Dr. med. Dr. rer. nat. Otmar Schober
- Prof. Dr.-Ing. habil. Helmar Schubert
- Prof. Dr. rer. nat. Andreas Tünnermann
- Prof. Dr. Karsten Weber
- Prof. Dr. phil. Dr.-Ing. E. h. Claus Weyrich

acatech dankt allen Fachgutachtern und Kommentatoren. Die Inhalte des vorliegenden Impulses liegen in der alleinigen Verantwortung von acatech.

> PROJEKTKOORDINATION

- Samia Salem, M.A., acatech Geschäftsstelle
- Dr. Ulrich Glotzbach, acatech Geschäftsstelle



> PROJEKTVERLAUF

Projektlaufzeit: 10/2010 – 11/2012

Dieser acatech IMPULS wurde im November 2012 durch das acatech Präsidium syndiziert.

> FINANZIERUNG

acatech dankt dem Förderverein für seine Unterstützung.

1 EINLEITUNG

Technische Gestalter gibt es seit Menschengedenken. Was die zeitgenössische Ingenieurarbeit jedoch von ihren historischen Vorläufern unterscheidet, ist, dass Ingenieure seit dem 18. Jahrhundert begonnen haben, ihre Tätigkeit zu verwissenschaftlichen und damit auf ein objektives, überprüfbares und verallgemeinerbares Fundament zu stellen. Darin standen Ingenieure nicht allein. Sie lieferten neben Natur- und Geisteswissenschaftlern, Ökonomen, Verwaltern und Ärzten ihren originären Beitrag zur wissenschaftlichen Durchdringung der Welt, indem sie ihr eigenes Handeln wissenschaftlichen Kriterien unterwarfen und dadurch sowohl mehr Sicherheit als auch höhere Produktivität erreichten. Bis weit in das 20. Jahrhundert hinein waren all dies Tätigkeiten, die von Männern dominiert wurden. Erst in der jüngsten Vergangenheit brechen hier die Geschlechterbarrieren auf. Gleichwohl trifft es überwiegend immer noch die Realität, wenn wir in diesem Text zugunsten der Lesbarkeit meist von dem Ingenieur sprechen, wenngleich für die Zukunft ein ausgeglicheneres Geschlechterverhältnis erstrebenswert ist.

Gemeinsame Frucht des disziplinübergreifenden Bemühens um ein wissenschaftliches Verständnis der Welt waren eine Erweiterung der Lebensräume und eine Verlängerung der Lebenserwartung, wie sie bislang in ihrer Dynamik historisch einmalig sind. Ganz unbestreitbar hat die Verwissenschaftlichung der Welt die Voraussetzungen für eine enorme Expansion von Lebensmöglichkeiten geschaffen. Trotz der unüberwindbaren Beschränkung menschlichen Wissens und menschlicher Handlungsreichweite, und trotz der immer noch anhaltenden Unfähigkeit zum dauerhaft friedlichen Umgang miteinander, ist dieser Aufbruch in die Moderne in hohem Maße positiv zu beurteilen. Ingenieure waren ein Teil dieser Bewegung, freilich ein Teil, der sich in der sichtbaren Welt und den Alltagserfahrungen in ganz besonderer Weise manifestiert hat. So wird der Ausschluss von den Errungenschaften der modernen Welt als Ungerechtigkeit und relative Armut erfahren.

Gleichwohl war es nicht das wissenschaftliche Verständnis als solches, das diese Dynamik ausgelöst hat, sondern seine potenzierende Wirkung auf das kreative technische Gestalten: Ingenieure vollziehen nicht einfach nur, was in der Natur angelegt ist, sondern schaffen etwas, das diese selbst nicht hervorbringt. Dass dies nur im Einklang mit den Naturgesetzen geschehen kann und dass viele Entwürfe von natürlichen Vorbildern und Problemlagen angeregt werden, mindert den autonomen Charakter technischer Gestaltung nicht. Wissenschaftliche Erkenntnis informiert über Möglichkeiten und Begrenzungen, nicht aber über gestalterische Ziele und die vielfältigen Wege zu ihrer Umsetzung. Indem die wissenschaftliche Erforschung der Natur, der Artefakte, des individuellen Verhaltens so wie der gesellschaftlichen Prozesse immer mehr Gewissheit über die Voraussetzungen und Rahmenbedingungen der Technik schuf, eröffnete sie der technischen Kreativität neue Horizonte. Dabei ging es im Sinne von Produktivität und Sicherheit in gleicher Weise um die Abwehr von Gefahren wie um das Schaffen zusätzlicher Handlungspotenziale. Moderne Technik entsteht auf einem wissenschaftlichen Fundament, weist aber gestalterisch darüber hinaus. Technik wird sicherer, indem die technischen Entwürfe einer Überprüfung mit wissenschaftlichen Methoden unterzogen werden.

In diesem Gestaltungsprozess arbeiten Ingenieure mit natürlichen Ressourcen und gesellschaftlichen Bedürfnissen, wobei Erstere verletzlich und endlich, Letztere umstritten und wechselhaft sind. Dabei kommt es ganz unvermeidlich zu vielfältigen Werte- und Interessenkonflikten, an deren Aushandlung Ingenieure als Teil der Gesellschaft beteiligt sind. In diesen Auseinandersetzungen besteht eine ihrer Aufgaben darin, Vorschläge und gangbare Wege zu möglichst einvernehmlichen Lösungen dieser Konflikte zu erarbeiten, soweit sie die technische Gestaltung unserer Welt betreffen.

Die sich wandelnde Ressourcenverfügbarkeit, vor allem aber deren wiederkehrende Neubewertung verlangen

ständig nach technischen Neuerungen. Ebenso drängen veränderte und sich angesichts der wachsenden technischen Potenziale erweiternde gesellschaftliche Bedürfnisse auf einen unablässigen Strom neuer technischer Lösungen. Da weder Natur immer und überall gleich ist noch die kulturell geprägten Bedürfnisse der Menschen auf wenige Grundformen reduzierbar sind, müssen diese technischen Lösungen sehr unterschiedlich sein. Ingenieure entwickeln und gestalten neue Produkte und Prozesse in vielfachen Formen, die die mannigfaltigen Interessen und Werthaltungen in der Gesellschaft ebenso widerspiegeln wie deren Veränderungen in der Zeit oder die Unterschiede zwischen Kulturen. Märkte, Planungen, politische Entscheidungen und Gerichte steuern die Auswahlprozesse.

Abstraktion und Modellbildung sind die wichtigsten intellektuellen Werkzeuge, derer sich Ingenieure bedienen und die spezifisch für die Verwissenschaftlichung der Technik sind. Gerade weil das Ziel technischen Gestaltens äußerste Konkretion ist, bedarf es der Abstraktion und der Modellbildung. Nur wenn die Konkretion gedanklich so weit wie erforderlich durchdrungen ist, kann sie verantwortet werden. Abstraktion verbindet das noch unbekannte Neue mit dem bereits Bekannten und wissenschaftlich Erforschten. Modellbildung erlaubt eine theoretisch und empirisch begründete Abschätzung des Verhaltens des Neuen in der Anwendung. Beide Werkzeuge, Abstraktion und Modellbildung, gehen jedoch der kreativen Gestaltung nicht voraus, sondern begleiten und inspirieren sie. Technische Gestaltung ist damit zugleich ein Abschätzen des Machbaren, das im Zuge eines Entwicklungsprozesses überprüft wird. Und im ständigen Dialog von Entwurf und Überprüfung entsteht das Produkt oder der Prozess.

Der Erfolg der technischen Gestaltung hängt ganz wesentlich davon ab, dass bei der Modellbildung keine relevanten Phänomene der Wirklichkeit ausgeblendet werden. Insofern drängen Entwurf und Entwicklung auf eine möglichst ganzheitliche Betrachtung der Technik in ihrem natürlichen

und gesellschaftlichen Umfeld. Diese ganzheitliche Sicht wiederum verankert die Ingenieurarbeit wie die Technikwissenschaften in einem interdisziplinären Netz. Technische Produkte und Prozesse sind im Allgemeinen komplex und müssen sich in einem vielfältigen Umfeld bewähren. Daher führt eine Reduktion von Komplexität zur Steigerung der Aussagepräzision in der Technik nicht immer zum Ziel. Da Randbedingungen nicht reduziert, sondern mit erfasst werden müssen, integrieren die Technikwissenschaften die Einsichten vieler verschiedener Disziplinen, um sie in der Ingenieurpraxis zu einer ganzheitlichen, immer wieder in ihren Einzelschritten überprüften Problemlösungsstrategie bündeln zu können.

Ingenieure haben sich, wie viele andere Berufsgruppen auch, für ihre Tätigkeit im Laufe der beiden vergangenen Jahrhunderte eine spezifische wissenschaftliche Basis geschaffen, die engen Anschluss an die breite Verwissenschaftlichung der Welt gesucht und gehalten hat. Durch die weitreichende Theorie- und Methodenverwandtschaft entstand eine besonders enge und fruchtbare Kommunikation der Technikwissenschaften mit den Naturwissenschaften, die jedoch nicht exklusiv war, wie dies in der viel zu kurz greifenden Formulierung der „angewandten Naturwissenschaften“ zum Ausdruck kommt. Für ein sinnvolles und erfolgversprechendes Entwerfen und Gestalten sind die Wissenschaften vom Verhalten des Menschen, von der Weise seines Wirtschaftens und vom Funktionieren gesellschaftlicher Institutionen und kulturell geprägter Lebensstile ebenso wichtig. Die Technikwissenschaften umfassen letztlich alles wissenschaftlich fundiertes Wissen, das wir über das Hervorbringen und Verwenden von Technik, deren praktische und kognitive Voraussetzungen sowie deren Folgen für Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft besitzen.

Trotz dieses umfassenden Anspruchs der Technikwissenschaften müssen wir berücksichtigen, dass die entstehenden Produkte und ihre Verwendung das in ihnen verkörperte Wissen transzendieren. Insofern sind die

Technikwissenschaften zwar ein sehr bedeutender Teil der Ingenieurarbeit und sicher ihr kognitiv solidestes und unverzichtbares Element, doch sie beschreiben die Tätigkeiten und Aufgaben des Ingenieurs nicht vollständig. Das bedeutet auch, dass Technikwissenschaften nicht nur an den Universitäten und Hochschulen praktiziert werden. Darum werden im Folgenden nicht nur die Technikwissenschaften detailliert vorgestellt, sondern es wird auch auf ihre Grenzen hingewiesen, jenseits derer die zwar wissenschaftlich beschreibbaren aber nicht immer wissenschaftlich erklärbaren Teile der Ingenieurarbeit geleistet werden. Gleichwohl bleibt festzuhalten, dass die Verwissenschaftlichung der Technik den größten Anteil an der Potenzierung der gestalterischen Möglichkeiten wie auch an der Steigerung der möglichen

Sicherheit technischer Produkte und Prozesse in der jüngeren Vergangenheit hatte. Sie ist das wirkmächtigste Instrument, das den heutigen Ingenieuren zu Gebote steht.

Als Menschenwerk ist eine verwissenschaftlichte Technik jedoch trotz aller Anstrengung notwendigerweise unvollkommen und kann nicht frei von Irrtümern sein. Dies ist bei der Gestaltung von Technik stets mitzubedenken: Die wissenschaftlichen Aussagen der Technik immer wieder zu überprüfen, ist die Grundverantwortung jedes Wissenschaftlers, aber ganz besonders des Ingenieurs. Er trägt eine herausgehobene Verantwortung für das Gedeihen unserer technischen Welt und für ihre Sicherheit bei aller unvermeidbaren Unvollkommenheit.

2 VOM INGENIEURWESEN ZU DEN TECHNIKWISSENSCHAFTEN

Ingenieure gestalten den Lebensraum der Menschen und ergänzen deren natürliche Fähigkeiten durch Geräte. Sie ändern die Form und die materielle Beschaffenheit der Umwelt, beeinflussen den Ablauf von Prozessen in der Natur und ergänzen die Umwelt durch Objekte, die aus natürlichen und künstlichen Stoffen geschaffen werden. Bei dieser Tätigkeit befassen sich Ingenieure mit natürlichen Gegebenheiten wie Luft, Wasser, Bodenschätzen und Biotopen ebenso wie mit Artefakten aus vielfältigen Materialien, beispielsweise Gebäuden, Straßen, Flugzeugen und Computern.

Technik hat die Lebensumstände der Menschen nachhaltig beeinflusst. Die Beherrschung des Feuers sowie Hebel und Rad sind Voraussetzungen der bestehenden Zivilisation. Teleskop, Mikroskop und Computer waren Katalysatoren für die Entwicklung der Wissenschaft und haben ihr neue Gebiete eröffnet, weil sie vorhandene menschliche Fähigkeiten wie das Sehen und Denken um viele Größenordnungen erweitert haben. Eisenbahn, Automobil, Flugzeug, Telefon, Generator, Hausgeräte, Fernseher und Computer haben das tägliche Leben tief geprägt.

Die Objektklassen und Prozesstypen des Ingenieurwesens sowie die Methodik der Ingenieurprojekte und die Struktur der damit befassten Organisationen haben sich über Jahrhunderte auf ein sehr hohes Niveau entwickelt. Dieser Erfolg spiegelt sich im Selbstverständnis der Ingenieure. Traditionell wollen Ingenieure durch ihr Wissen und Können Nutzen schaffen. Doch nicht nur in der Gegenwart ist diese Haltung an Grenzen gestoßen. Technik ist immer ambivalent. Die Planung und Ausführung von Ingenieurprojekten stehen vor der ständigen Herausforderung, den gewünschten Nutzen ohne unvermeidbare schädliche Nebenwirkungen zu erzielen. Die schwierige Abwägung zwischen Nutzen und Schaden nach Kriterien, welche die Gesellschaft vorgibt, ersetzt zwangsläufig die einfache, aber in der Praxis meist uneinlösbare Forderung nach Nutzen ohne Schaden. Dies erfordert den permanenten gesellschaftlichen Diskurs

über die Ziele und Folgen der Technik. Die sich wandelnde Ressourcenverfügbarkeit, vor allem die Neubewertung der Verletzlichkeit der verfügbaren Ressourcen, sowie die begrenzte Tragfähigkeit der Erde für nicht mehr genutzte Reststoffe verlangen ständig nach technischen Neuerungen. Ebenso drängen veränderte und sich angesichts der wachsenden technischen Potenziale erweiternde gesellschaftliche Bedürfnisse auf einen unablässigen Strom neuer technischer Lösungen.

Es ist dem Ingenieurwesen im Verlauf der Jahrhunderte gelungen, viele Wünsche der Menschheit zu erfüllen. Das hat einen Gewöhnungseffekt ausgelöst, der sich heute zum Nachteil des Ingenieurwesens auswirkt. Die Technik ist gewissermaßen ein Opfer ihres Erfolgs geworden, weil als nahezu selbstverständlich vorausgesetzt wird, dass auftretende Probleme technisch, d. h. mit Hilfe der Ingenieurkunst, lösbar sind. Von technischen Systemen werden vollständige Funktionstüchtigkeit und absolute Sicherheit erwartet. Diese Haltung der Gesellschaft ist verständlich aber wirklichkeitsfremd. Im Mittelpunkt des Ingenieurwesens steht nicht das Absolute, sondern der sorgfältig ausgewogene Kompromiss, der die Unvollständigkeit des Wissens berücksichtigt. Wenn Ingenieur und Gesellschaft zusammen Nutzen und Schaden abwägen wollen, so ist dies nur auf der Grundlage eines gemeinsamen Verständnisses der Grenzen des Ingenieurwesens und des realistisch Erreichbaren möglich.

Ingenieurarbeit hat sowohl wissenschaftliche als auch künstlerische Anteile: Das Gestalten orientiert sich zwar an rationalen Einsichten, allgemeinen Prinzipien und Forschungsergebnissen, es ist jedoch primär ein kreativ gesteuerter Vorgang. Besondere Fähigkeiten zur Formgebung, zur Wahl geeigneter Materialien und zur Erfindung technischer Abläufe sind Begabungen von Individuen, vergleichbar mit den besonderen Veranlagungen von Komponisten, Malern und Dichtern. Das Talent zum Gestalten wird durch das Studium von Beispielen aus der Ingenieurgeschichte und durch persönliche praktische Erfahrung verstärkt.

Die Gesellschaft stellt Aufgaben an das Ingenieurwesen, ermöglicht die Durchführung von Ingenieurprojekten und überwacht ihre Auswirkungen. Ingenieure sind verpflichtet, die äußeren Einflüsse auf die von ihnen gestalteten Objekte und Prozesse zu identifizieren sowie ihr Verhalten infolge dieser Einflüsse vorherzusagen und zu bewerten. Diese Aufgabe wurde über Jahrhunderte hinweg als Komponente des Gestaltens ebenfalls intuitiv und empirisch gelöst. Trotz früher Erfolge wie dem Beweis der Hebelgesetze durch Archimedes dauerte es viele Jahrhunderte, bis eine systematische rationale Grundlage für das Ingenieurwesen als Ganzes gefunden wurde. Die Entwicklung der Biegetheorie für Balken dauerte 300 Jahre, nachdem Leonardo da Vinci das Problem qualitativ angesprochen hatte. Heute ist es selbstverständlich, dass Objekte, Prozesse und Systeme mit ständig wachsender Komplexität in abstrakten, das heißt formalisierten, meist mathematisch dargestellten Modellen abgebildet werden, und dass ihr Verhalten mithilfe dieser Modelle vorhergesagt, bewertet und gesteuert wird. Diese Komplexität konnte nur durch Abstraktion und die damit verbundene Generalisierung beherrscht werden. Mit der Erfindung der Computer wurde es möglich, auch komplexe Gegebenheiten in adäquaten Modellen mit vertretbarem Aufwand zu behandeln.

Die Anfänge wissenschaftlich-systematischen Nachdenkens über Technik reichen bis in die alten Hochkulturen und in die Antike zurück. Eine feste institutionelle Form gewann es durch die Gründung technischer Schulen für die Ausbildung von Ingenieuren für den Staatsdienst, vor allem für das Bauwesen, den Bergbau und das Militär. Dies begann in

Frankreich um 1700 und wurde von anderen Staaten im 18. und 19. Jahrhundert aufgegriffen. Seit dem frühen 19. Jahrhundert kamen technische Schulen für die Ausbildung von Industrieingenieuren hinzu, die sich im Laufe der Zeit zu Polytechnischen Schulen, Technischen Hochschulen und Universitäten entwickelten.

In diesem Institutionalisierungsprozess wurde das methodische Instrumentarium der Technikwissenschaften durch Praxis, Forschung und Lehre ständig erweitert. Diese profitierten zum einen von der Physik, insbesondere der Mechanik, der Chemie und der Mathematik; zum anderen profitierten sie von dem weit vorangeschrittenen Ingenieurwesen, das sie wissenschaftlich zu durchdringen versuchten. Ein wichtiger Schritt in der Entwicklung der Technikwissenschaften bedeutete die Einrichtung und der Ausbau von Laboratorien und Versuchsfeldern seit dem 19. Jahrhundert. In diesen erzeugten die Technikwissenschaften umfangreiches empirisches Wissen, das in technikwissenschaftliche Regeln und Modelle Eingang fand.

Die inhaltliche und institutionelle Ausdehnung des Ingenieurwesens sowie die zunehmende Bedeutung der Industrie stellten die Ingenieure vor immer komplexere und vielfältigere Aufgaben. Intuitive Gestaltung und systematisch-empirische Lösungsansätze allein waren zur Lösung der von Gesellschaft, Staat und Wirtschaft gestellten Aufgaben nicht mehr ausreichend. Daher wurden die technikwissenschaftlichen Modelle immer komplexer und bezogen mehr und mehr Wissen aus den Wirtschafts-, Sozial- und Kulturwissenschaften ein.

3 DIE TECHNIKWISSENSCHAFTEN UND IHR ORT IN DEN WISSENSCHAFTEN

3.1 WISSENSCHAFTEN

Wissenschaften lassen sich sowohl kognitiv als auch sozial interpretieren. Einerseits handelt es sich um Wissenssysteme (Corpus des mit wissenschaftlicher Methodik gewonnenen und mit dieser Methodik kritisierbaren Wissens), andererseits um Wissenschaftsgemeinschaften (Disziplinen und Institutionen).

Die Wissenschaften sammeln, kodifizieren und erzeugen theoretisches, formales und empirisches Wissen. Dieses wird unter bestimmten, historisch und kulturell varianten Perspektiven gewonnen, bezieht sich also immer nur auf Aspekte des Gegenstandsbereichs. Im Unterschied zu anderen Wissensformen, wie Alltagswissen, wird wissenschaftliches Wissen auf besonders aufwändige Weise gewonnen, geprüft und gesichert. Wissenschaftliches Wissen wird auf methodische Weise geschaffen, nachvollziehbar begründet, intersubjektiv überprüft und in bestehende Wissensbestände integriert. Empirische und theoretische Arbeiten sollen nachvollzogen, experimentelle wiederholt werden können. Die zugrunde liegenden Voraussetzungen sollen benannt, die durchgeführten Überlegungen und Prozeduren expliziert werden. Wissenschaftliches Wissen soll für seinen jeweiligen Gegenstand so weit wie möglich Kohärenz (Zusammenhang) und Konsistenz (Widerspruchsfreiheit) aufweisen. Es hat sich in der kritischen Diskussion der Fachgemeinschaften und in der Anwendung zu bewähren. Aufgrund seiner methodischen Gewinnung und Absicherung besitzt wissenschaftliches Wissen einen höheren Grad an Begründetheit (Validität und Reliabilität) und damit Legitimität als andere Wissensformen.

Die Erzeugung, Prüfung und Sicherung wissenschaftlichen Wissens findet in Disziplinen statt, das heißt in durch die Wissenschaftsgemeinschaft geschaffenen Institutionen. Wissenschaftsgemeinschaften entstehen in der Regel durch Herauslösung aus etablierten Wissenschaften oder durch Verwissenschaftlichung existierender Praxen. Sie

gruppieren sich um neue Erkenntnisse oder sie wollen einen Beitrag zur Lösung gesellschaftlicher Probleme leisten. Institutionalisierungen, wie die Schaffung wissenschaftlicher Einrichtungen, Fachgesellschaften oder Publikationsorgane, dienen der Sicherung von Wissenschaftsgemeinschaften. Die Anerkennung oder auch Verwerfung neuer Wissenschaftsgemeinschaften und Institutionen erfolgt durch das Wissenschaftssystem in seiner Gesamtheit. Disziplinen können sich auch wieder auflösen, wenn das sie konstituierende Problemfeld keine wissenschaftliche oder gesellschaftliche Relevanz mehr besitzt.

Die Gliederung des Wissenschaftssystems in Disziplinen und Disziplinengruppen ist das Ergebnis eines dynamischen und zukunfts offenen historischen Prozesses. Zwischen den disziplinären Feldern bestehen keine scharfen Grenzen, sondern sie verändern sich aufgrund der wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Entwicklungen und der damit einhergehenden Uminterpretationen. So unterscheidet man heute vielfach zwischen den Wissenschaftsgruppen Geistes-, Kultur-, Sozial-, Natur-, Lebens- und Technikwissenschaften. Diese überlappen sich und einzelne Disziplinen lassen sich mehrfach zuordnen.

Die Disziplinengruppen und Disziplinen unterscheiden sich hinsichtlich der Art und Weise, wie sie wissenschaftliches Wissen erzeugen, prüfen und sichern, sowie hinsichtlich ihres Gegenstands, ihrer Ziele, Methoden und Institutionen. So bemühen sich die Geisteswissenschaften um das Verständnis und die Deutung der Ergebnisse geistigen Schaffens mit einem Schwerpunkt auf Texten. Die Kulturwissenschaften suchen einzelwissenschaftliche Perspektiven zu überwinden, indem sie zum Beispiel übergreifend nach der symbolischen Bedeutung menschlicher Handlungen und deren Ergebnissen fragen. Die Sozialwissenschaften untersuchen das gesellschaftliche Zusammenleben der Menschen, die Wirtschaftswissenschaften untersuchen Strukturen und Bedingungen ökonomischen Handelns. Die Naturwissenschaften erklären die ungestaltete

sowie die vom Menschen gestaltete Natur, indem sie zugrunde liegende Gesetzmäßigkeiten herausarbeiten und, bei bekannten Anfangs- und Randbedingungen, Prognosen über den Ablauf von Prozessen machen. Die Lebenswissenschaften beschäftigen sich mit Prozessen und Strukturen des Lebendigen.

Technikwissenschaften schaffen kognitive Voraussetzungen für Innovation in der Technik und Anwendung technischen Wissens und legen die Grundlagen für die Reflexion ihrer Implikationen und Folgen.

Die Wissenschaftsdisziplinen lassen sich in „Erkenntniswissenschaften“ und „Handlungswissenschaften“ unterteilen. Den Erkenntniswissenschaften geht es vor allem um die Erzeugung empirischen und theoretischen Wissens, während dessen praktische Anwendung nachrangig ist. Sie zielen auf ein sich durch Kohärenz und Konsistenz auszeichnendes Wissenssystem. Den Handlungswissenschaften geht es um Wissen, das geeignet ist, praktische Handlungen anzuleiten. Es bewährt sich also in Handlungskontexten; Abstriche hinsichtlich Kohärenz und Konsistenz werden in Kauf genommen. Erkenntniswissenschaften streben nach Vervollständigung des grundlegenden Wissens; Handlungswissenschaften gehen wegen der unbegrenzten Zahl möglicher Handlungssituationen grundsätzlich mit unvollständigem Wissen um. Tendenziell gehören zum Beispiel die Natur- und die Geisteswissenschaften eher in die Gruppe der Erkenntniswissenschaften, die Technikwissenschaften und die Medizin eher in die Gruppe der Handlungswissenschaften. Alle angeführten Wissenschaften besitzen eine theoretische (allgemeine Grundlagen), empirische (spezifische Aussagen) und eine praktische Seite (Anwendung). Theorie, Empirie und Praxis sind in den einzelnen Wissenschaften allerdings unterschiedlich ausgeprägt und haben einen unterschiedlichen Stellenwert. Eine eindeutige Zuordnung der Wissenschaftsgruppen zu den klassifizierenden Charakteristika ist also nicht gegeben.

3.2 SPEZIFIKA DER TECHNIKWISSENSCHAFTEN

Bei den Technikwissenschaften handelt es sich um eine eigenständige Wissenschaftsgruppe, die sich hinsichtlich ihres Gegenstands, ihrer Ziele, Methoden und Institutionen von den anderen Wissenschaften unterscheidet. Um den Kern der Technikwissenschaften herum gruppiert sich ein Feld von Subdisziplinen, das sich mit dem anderer Disziplingruppen überlagert. Es bestehen also unscharfe „Grenzen“ zu anderen Disziplinen und Disziplingruppen, wie bei der Biotechnologie, der Informatik oder manchen angewandten Naturwissenschaften. Die Wissenschaften profitieren wechselseitig voneinander, indem sie theoretische Konzepte, methodische Verfahren und empirische Ergebnisse austauschen. In diesem Austauschprozess kann jede Wissenschaft zur Hilfswissenschaft einer anderen werden. Und schließlich lassen sich zahlreiche konkrete Entwicklungsaufgaben nur noch interdisziplinär angehen, wie zum Beispiel die maschinelle Spracherkennung in einer Kooperation von Informatik, Akustik und Linguistik.

Der *Gegenstand* der Technikwissenschaften ist die Technik, verstanden als künstliche, zweckgerichtete und materielle sowie immaterielle Elemente besitzende Objekte und Prozesse. Technikwissenschaften untersuchen die Technik hinsichtlich ihrer Struktur und Funktion, ihrer ökologischen Dimension sowie ihrer soziokulturellen Entstehungs- und Verwendungszusammenhänge. Dabei geht es um den gesamten Lebenszyklus der Technik, das heißt um deren Konzeption, Herstellung, Verwendung und Entsorgung bzw. Recycling. Dieser Gesamtzusammenhang wird oftmals, wenngleich etwas ungenau, als Technologie bezeichnet (vgl. Kap. 4.1). Der Gegenstand Technik zeichnet sich durch eine hohe Komplexität aus. Diese ergibt sich einerseits aus der Vielfalt der Technik, andererseits aus deren soziokultureller und damit auch ökonomischer Einbettung und schließlich aus den dadurch entstehenden zahlreichen Zusammenhängen. Zur Komplexität trägt auch die Zeitdimension bei; denn die einzelnen Schritte des technischen Handelns erstrecken sich teilweise über lange Zeiträume.

Technik gehört untrennbar zum Menschen und durchdringt dessen gesamtes Leben. Es ist deswegen nicht verwunderlich, dass sich neben den Technikwissenschaften noch zahlreiche andere Disziplinen mit der Technik befassen. Dabei handelt es sich um disziplinäre Spezialisierungen, wie bei der Technikphilosophie, der Technikgeschichte oder der Techniksoziologie, oder um Disziplinen, wie die Wirtschafts- oder die Arbeitswissenschaft, welche die Technik in vielen Aspekten in ihre Arbeiten einbeziehen. Die Technikwissenschaften legen dagegen ihren Schwerpunkt auf die Technik. Sie zielen auf die Gestaltung der Technik und entwickeln hierfür eine spezifische Methodik, während für die meisten der genannten anderen Disziplinen Technik ein Gegenstand unter vielen ist.

Das *Ziel* der Technikwissenschaften besteht in der Erzeugung von Gesetzes-, Struktur- und Regelwissen über Technik – in der Absicht, dieses in technischen Anwendungen zu nutzen. Sie erzeugen also Erklärungen und zur Anwendung bestimmtes Wissen, das dann in der technischen Praxis für einen bestimmten Zweck eingesetzt wird. Allgemein gesprochen besteht das Ergebnis der empirischen und theoretischen technikwissenschaftlichen Arbeiten in erweiterten Möglichkeitsräumen für das technische Handeln. Die Technikwissenschaften antizipieren die spätere Anwendung des Wissens über Technik und ihre Wechselwirkungen mit dem Umfeld, was zur Integration ökologischer, wirtschaftlicher, kultureller und sozialer Überlegungen in technikwissenschaftliche Modelle führt (vgl. Kapitel 4.2). Das Regelwissen enthält Zweck-Mittel-Relationen und damit implizite oder auch explizite Handlungsanleitungen (vgl. Kapitel 4.1). Technisches Wissen beinhaltet Funktionsvermutungen und diese implizieren wiederum Ziele und Zwecke (vgl. Kapitel 4.1). Technikwissenschaftliche Aussagen beanspruchen Gültigkeit in spezifischen Anwendungskontexten; sie haben sich letztlich in der Praxis zu bewähren.

Zahlreichen anderen Wissenschaften geht es mehr um Erkenntnis als um Anwendung. Auch die Technikwissenschaften verfolgen das Ziel der Erkenntnis, aber immer unter der

Maxime, die Erkenntnisse – wann und wie auch immer – in Praxis zu überführen (vgl. Kapitel 5). Darüber hinaus führen die Technikwissenschaften auch konkrete Entwicklungsarbeiten durch, wobei diese allerdings in der Regel nicht bis zur Vermarktung der Technik gehen. Vielmehr dienen diese Konkretisierungen eher der Evaluation oder der Demonstration der Ergebnisse. Die ausgeprägte Handlungsorientierung der Technikwissenschaften gibt es auch in anderen Disziplinen oder Teildisziplinen, wie in der Medizin und in Teilen der Soziologie oder der Wirtschaftswissenschaften, aber dort bezieht sie sich auf Handlungsbereiche anderer Art.

Die *Methoden* der Technikwissenschaften zeichnen sich durch eine zielorientierte Vielfalt aus, die von rational-systematischen bis zu intuitiv-heuristischen Methoden reicht. Dabei machen die Technikwissenschaften methodische Anleihen bei anderen Wissenschaftsgruppen, wie den Natur-, Wirtschafts- und Sozialwissenschaften. Insbesondere von den Naturwissenschaften haben sie Strategien der Formalisierung und Mathematisierung übernommen, vor allem von den Sozial- und Wirtschaftswissenschaften innovations-theoretische Überlegungen. Darüber hinaus erzeugen die Technikwissenschaften selbst Regelwissen in spezifischen Experimenten, Tests und Simulationen (vgl. Kapitel 4.3) und verarbeiten Erfahrungen aus der technischen Praxis. Die Technikwissenschaften bleiben nicht bei der Technikanalyse stehen, sondern entwickeln Methoden der Synthese für die Gestaltung des Neuen.

Wissenschaften besitzen in aller Regel kein Monopol auf bestimmte Methoden. Die wissenschaftliche Normalität besteht vielmehr in einem methodischen Austausch zwischen den Disziplinen bzw. in einer Spezifizierung allgemeiner Methoden auf die eigenen Anforderungen. Ein allgemeines Charakteristikum technikwissenschaftlicher Methodik besteht darin, dass in höherem Maße als in vielen anderen Wissenschaften, insbesondere den Naturwissenschaften, die Komplexität des jeweiligen Gegenstands bei der Modellbildung berücksichtigt wird. Ein weiteres Charakteristikum

besteht in der Heterogenität des in Modellen zusammenzuführenden Wissens. Hinsichtlich der Komplexität und Heterogenität bestehen Parallelen zum Beispiel zu den Geschichtswissenschaften, die ihr Wissen jedoch viel weniger formal verarbeiten als die Technikwissenschaften. Eine weitere Besonderheit, welche die Technikwissenschaften mit anderen Handlungswissenschaften wie der Medizin teilen, ist der Stellenwert von Methoden bei der Synthese. Das entscheidende Problem besteht darin, die heterogenen Wissensbestände unterschiedlicher Herkunft in Modellen zu integrieren, die der Komplexität des Untersuchungsgegenstands und der Komplexität der Frage- und Zielstellungen gerecht werden. Die technikwissenschaftlichen Modelle müssen also ein hohes Maß an Ganzheitlichkeit und Komplexität bewahren, sodass die Anwendungsqualität der Ergebnisse nicht beeinträchtigt wird. Gleichzeitig verbleibt in den Technikwissenschaften wie auch in der Technik im Allgemeinen ein Bereich der Vermutungen und der nicht in aller Tiefe erhärteten Sachverhalte.

Die meisten Wissenschaften sind in Form wissenschaftlicher *Institutionen*, d. h. überindividuell geltenden Regelwerken, und Einrichtungen organisiert. Dies gilt auch für die Technikwissenschaften, doch besitzen diese darüber hinaus große Überlappungen und intensive Austauschbeziehungen mit anderen Wissenschaften wie auch mit der technischen Praxis. Technikwissenschaftliche Institutionen finden sich an Universitäten und Hochschulen, an außeruniversitären Forschungseinrichtungen, aber auch in der Industrie. Die Technikwissenschaften bilden Ingenieure aus, technikwissenschaftliche Forschungsergebnisse fließen

in die Ingenieurpraxis ein, und die Technikwissenschaften integrieren in ihre Modelle Erfahrungen der technischen Praxis. Solche Überschneidungen zwischen Wissenschaft und Praxis finden sich auch in anderen Wissenschaften. Ähnliche Konstellationen bestehen in der Jurisprudenz und in der Medizin. Die angeführten Handlungswissenschaften verbinden in fruchtbarer Weise technische Wissenschaft und Ingenieurkunst, Rechtswissenschaft und Rechtsprechung, medizinische Wissenschaft und ärztliche Kunst.

Damit lassen sich die Aufgaben der Technikwissenschaften wie folgt zusammenfassen:

1. Die Technikwissenschaften erforschen die Prozesse und entwickeln die Methoden, die der Ingenieur anwenden und umsetzen soll. Nur mit diesen Methoden wird es möglich, über Modellbildungen und daraus abgeleiteten Simulationen die Funktionsfähigkeit komplexer Systeme im Vorhinein zu beurteilen und ihre Auswirkungen zum Beispiel für die Umwelt zu erfassen.
2. Die Technikwissenschaften bewerten bestehende komplexe Systeme im Hinblick auf die Lösungsfähigkeit zu gesellschaftlich anerkannten Problemen und erforschen die zugehörigen wissenschaftlichen Grundlagen.
3. Die Technikwissenschaften helfen dem praktisch tätigen Ingenieur bei der Auswahl der Komponenten eines Systems und bei der Beurteilung der Lebensdauer und des Sicherheitsrisikos dieser Komponenten.

4 ERKENNEN IN DEN TECHNIKWISSENSCHAFTEN

Die Technikwissenschaften weisen einerseits theoretisch-empirische Forschungsverfahren und andererseits Praktiken der Gestaltung und Anwendung auf. Vielfach haben sich im Laufe der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts die Unterschiede zwischen diesen Bereichen, wie in vielen anderen Wissenschaften auch, verwischt. Die frühere klassische Trennung in die als höherwertig angesehene Grundlagenforschung und die eher als nachrangig angesehene angewandte Forschung hat sich institutionell, methodisch und in der Praxis der Wissenschaft und Forschung immer mehr aufgelöst. Die Naturwissenschaften sind technischer und die Technik ist wissenschaftlicher geworden.

Ein weiteres Phänomen kann für alle Disziplinen wahrgenommen werden: Jede Disziplin kann Hilfswissenschaft einer anderen Disziplin sein. Eine Rangfolge, welcher Art auch immer, ist obsolet. So sind die Grenzen fließend und je nach Ausrichtung kann bei Forschung, Lehre und Entwicklung der eine oder andere Bereich ein größeres Gewicht erhalten. Auch kann die Reihenfolge variieren, in der diese Bereiche im Laufe von Projekten in den Technikwissenschaften durchlaufen werden. Jedoch stehen Anwendung und Gestaltung im Vordergrund. Die Technikwissenschaften bereiten das Wissen vor, das in der technischen Praxis und in der konkreten Gestaltung erforderlich ist.

4.1 THEORETISCHES UND EMPIRISCHES WISSEN IN DEN TECHNIKWISSENSCHAFTEN

Alle Disziplinen der Technikwissenschaften weisen theoretisches, formales und empirisches Wissen auf. Der in Lehrbüchern häufig dargestellte, idealisierte Weg

abgesicherte Regularitäten → Vorhersage →
Experiment → Funktionalprognose → Versuch →
Prototyp → Test → Prüfung → Vorhersage der
Machbarkeit → Realisierung → Bewährung

ist nur eine Form des technikwissenschaftlichen Vorgehens. Viele dieser Schritte werden iterativ und/oder rückgekoppelt durchlaufen, einige werden übersprungen und meist wird auch nicht die ganze Reihe vollständig abgearbeitet, oft wird auch mitten in der Kette angefangen. Wo eine technikwissenschaftliche Tätigkeit beginnt, hängt von der Fragestellung und dem konkreten Problem ab. Technische Gestaltung braucht die Kenntnis der technischen Funktionen. Oftmals werden technische Funktionen auch erst durch Gestaltungsversuche etwa nach dem Verfahren des Versuchs und Irrtums entdeckt und dann durch Abstraktion verdichtet. Umgekehrt können aus der Kenntnis von Naturgesetzen technische Funktionen und Regeln erschlossen werden, auch wenn dies nicht rein deduktiv geschehen kann. Eine erfolgreiche Anwendung bewährter Regeln kann ein Hinweis auf zugrundeliegende Gesetzmäßigkeiten sein, darf aber nicht einem Beweis gleichgesetzt werden.

Die Technikwissenschaft befasst sich zum einen mit der vorfindlichen, zum anderen mit der geplanten oder als möglich vorstellbaren Technik. Empirisches wie theoretisches technikwissenschaftliches Wissen wird notwendigerweise durch Wissen aus den Natur-, Geistes- und Sozialwissenschaften ergänzt, da die technischen Gestaltungsmöglichkeiten selbst Grenzen unterworfen sind, die sich aus naturwissenschaftlichen Erkenntnissen, aber auch durch die Einbettung des Gebrauchs von gestalteter Technik in der Gesellschaft ergeben. Diese Einbettung wird in den Geistes-, Kultur- und Sozialwissenschaften erforscht. Zu den Sozialwissenschaften werden hier auch die Wirtschafts- und Rechtswissenschaften gezählt. Diese Disziplinen sind für das Verständnis von Problemen, die bei Folgen und Nebenfolgen technikwissenschaftlicher Erkenntnisse und Gestaltung auftreten, von großer Bedeutung, zum Beispiel bei ethischen Fragen, bei Fragen der Akzeptanz, des Missbrauchs und der Begründung von Zwecksetzungen.

Das theoretische Wissen stellt sich in seiner gesetzesartigen Aussagenform (*law like*) wie Naturgesetze dar, technische Phänomene (*fact like*) und organisatorische wie sozialwissenschaftliche Phänomene werden als Aussagen über Regelmäßigkeiten ausgedrückt. Obwohl beide Aussagenarten in der Form von „wenn – dann“-Aussagen ($A \rightarrow B$) strukturiert sind, sind sie nicht auseinander ableitbar. Werden Aussagen beider Art für Prognosen verwendet, werden sie meist deduktiv aus der Theorie gewonnen und beziehen sich darauf, in welchem Zustand sich ein Objekt zu einer bestimmten Zeit befinden wird. Eine solche Zustandsvermutung ist deskriptiv, sie baut als explizite Erklärung von Phänomenen auf benennbaren Ursache-Wirkungs-Relationen auf, das heißt, sie kann die Einzelphänomene unter ein Gesetz oder eine Regularität subsummieren.

Wenn es um die Begründung technischer Praxis geht, hat das Wissen nicht mehr die Form von Gesetzen in obigem Sinne, sondern die Form von Regeln wie „Wenn B sein soll, muss man A tun“, kurz: *B per A*. Dies können auch Handlungsanleitungen, Programmstatements, Warnungen, etc. sein. Solche Aussagen sind nicht mehr wahrheitsdefinit wie im deduktiven Fall, sondern erweisen sich als effektiv oder nicht. Es geht also nicht um das Zutreffen des Wissens, sondern um dessen Wirkung bei der Anwendung oder Umsetzung.

Bei der Begründung technischer Praxis reichen rein deskriptive Aussagen über die Fülle der Erfahrungen technischer Machbarkeiten nicht mehr aus. Die Gewinnung neuer Erkenntnisse geschieht u. a. mit Hilfe von Simulation, Experiment und Test (vgl. Kap. 4.3). Die Schlussweise ist in diesen Bereichen nicht mehr rein deduktiv (vom Gesetz auf den Einzelfall), sondern abduktiv, das heißt, von Teileigenschaften wird auf das Zutreffen von Gesamteigenschaften geschlossen. Dies ist zwar keine in der Logik zugelassene Schlussweise, liefert aber Kandidaten für Funktionsvermutungen, die dann geprüft werden müssen, denn die Vermutung ist nicht deduktiv sicher. Da es sich beim Wissen in diesem Bereich nicht um Kausalrelationen, sondern um

konkrete Ziel-Mittel-Relationen handelt, ist dieses Wissen letztlich bedingt präskriptiv (vorschreibend), also nicht mehr rein deskriptiv, sondern normativ, weil mit dem Ziel immer eine Wertung einhergeht.

Eine Theorie in den Technikwissenschaften ist eine Menge von explizit benennbaren, untereinander verknüpften Regeln, die sich im Test als effektiv erwiesen haben und die untereinander im Hinblick auf ihre Effektivität konsistent sind. Man kann dabei eine substantielle und eine operative Ebene unterscheiden: Auf der substantiellen Ebene werden durch die Theorie untereinander verknüpfte Regeln angegeben, wie man beispielsweise ein Mikroskop oder ein Flugzeug baut. Auf der operativen Ebene liefert die Theorie Regeln, wie man, um im Beispiel zu bleiben, Mikroskope einsetzt oder Flugpläne optimiert. Eine beide Ebenen umfassende Theorie wird oft als technologische Theorie bezeichnet, zuweilen auch nur kurz Technologie (vgl. Kap. 3.2). Sie enthält immer substantielle und operative Anteile.

Im Bereich der Gestaltung geht es um die Durchführung von Regeln für die Gestaltung als auch für die Nutzung vorhandener oder angedachter Technik. Hier sind die entscheidenden Maßstäbe, sofern Effektivität vorausgesetzt werden kann, das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand, also Effizienz. Hierzu gehört eine hinreichend lange Erfüllung der technischen Funktion. Auch dies kann man als technische Erfahrung, also empirisches Wissen, bezeichnen. Die Hypothesen in diesem Bereich beziehen sich auf Fähigkeiten und technische Funktionen, und stellen, genauer betrachtet, Machbarkeits- und Herstellungsvermutungen dar. Diese daraus gewonnenen Aussagen sind possibilistisch-normativ: „Es muss möglich sein, x zu bauen, wenn man die Funktion y erfüllt haben möchte“. Die Struktur des Wissens in diesem Bereich ist teilweise explizit wie bei Richtlinien, Normen oder Leistungsheften und damit einer technikwissenschaftlichen Theorie zugänglich, und teilweise implizit in Form einsetzbaren Könnens, das schlecht oder gar nicht sprachlich ausgedrückt oder niedergelegt werden kann und deshalb auch

schlecht theoretisch überprüfbar ist. Die Beurteilung von Wirkungen (Erfüllung technischer oder organisatorischer Funktion) muss zudem auch immer in ein Verhältnis zu ihren intendierten wie nicht intendierten Nebenwirkungen gebracht werden.

4.2 MODELLBILDUNG

Im Mittelpunkt der Technikwissenschaften stehen Modelle. Verschiedenartige Modelle werden zur Beschreibung von Sachlagen und ihrer Umgebung, zur Formgebung sowie zur Darstellung, Vorhersage und Steuerung des Verhaltens von Objekten unter äußeren Einflüssen genutzt. Zweck der Modelle ist neben der geordneten Gewinnung, Speicherung und Präsentation von Information insbesondere die Beherrschung der Komplexität der Zusammenhänge in der Umwelt und menschlichem Handeln.

Konkrete Modelle haben in Architektur und Ingenieurwesen eine lange Tradition. So dienten große Kirchenmodelle in der Renaissance zur Veranschaulichung der Entwürfe und wurden von Architekten und kirchlichen Bauherren bei ihren Entscheidungen genutzt. Meterhohe sauber gearbeitete Holzmodelle dienten den Zimmerleuten als Vorlage für diffizile Kirchturm- und Brückenkonstruktionen. Geometrische Modelle des 19. und 20. Jahrhunderts entstanden als zweidimensionale Risse am Zeichenbrett. Indem diese Modelle mit Beschreibungen und Berechnungen ergänzt wurden, erfolgte der Übergang von konkreten geometrischen zu abstrakten physikalischen Modellen, die auch zur Vorhersage des mechanischen Verhaltens geeignet waren. Heute ermöglichen Computer mit geeigneter Software hochentwickelte und wirklichkeitsnahe Modelle in allen Bereichen des Ingenieurwesens.

Grundlage der Modellbildung ist die Konstruktion der Modelle aus generalisierten Bestandteilen nach allgemeinen Regeln. Dazu gehören Konzepte wie das Selektieren,

Klassifizieren, Abbilden, Transformieren und Vereinfachen. Mit diesen Konzepten wird das Wissen der Ingenieure über den Lebensraum und die künstlichen Objekte strukturiert und teilweise mathematisch formuliert. Es wird möglich, allgemeine Regeln aufzustellen und Abläufe zu gliedern, um so das komplexe Ingenieurwesen zu ordnen. Ausgebildete Ingenieure werden in die Lage versetzt, nicht nur die zu entwerfenden Objekte und Prozesse in Modellen abzubilden, sondern auch Systeme des Lebensraums systematisch einzubeziehen. Mit den Modellen gelingt es, wesentliche Verhaltensweisen der Systeme zu erkennen, zu bewerten und durch geeigneten Entwurf zu steuern. Die Abstraktion in den Technikwissenschaften fördert so die pragmatische Problemlösung in der Ingenieurpraxis.

Die Anforderungen der Praxis des Ingenieurwesens bestimmen Art und Inhalt brauchbarer Modelle. Diese Inhalte sind im Folgenden aus der Sicht des praktizierenden Ingenieurwesens dargestellt. Damit wird zugleich sichtbar, wie die von den Technikwissenschaften entwickelten Modelle diesen Anforderungen gerecht werden.

Modelle sind immer Modelle von etwas und für etwas. Die Modellbildung kann sich der Begrifflichkeit der Systembeschreibung bedienen, wonach ein System aus Elementen respektive Subsystemen, deren Verhalten und der Struktur, das heißt der Verknüpfung zwischen diesen Subsystemen besteht. Systeme werden begrifflich durch eine Systemgrenze vom Umfeld separiert und ihre Verbindung mit diesem Umfeld wird durch die Festlegung der Eingangs- und Ausgangsgrößen bestimmt. Diese Begrifflichkeit ist für die Modellbildung von Eigenschaften und Prozessen sehr nützlich, deren Charakteristik überwiegend von der Verknüpfung elementarer Bausteine mit definiertem Verhalten abhängt. Der entscheidende Schritt bei jeder Modellbildung ist die Trennung der gegebenen und zu verändernden Sachlage, also eines Ausschnitts der Welt, vom Inhalt ihrer Umgebung. Der Begriff Inhalt ist weit gefasst. Er umfasst beispielsweise Gegenstände, Ereignisse und Organisationsformen sowie

ihre Attribute und Wechselwirkungen, aber auch Gedanken, Entscheidungen und Bewertungen. Das Modell entspricht als Abbildung mit abstrahierten Attributen, Methoden und Randbedingungen der Sachlage und der Umgebung mit ihren tatsächlichen Attributen und Abläufen in der Welt.

Die Festlegung, was noch zum Modell gehört und was nicht, ist daher immer eine Entscheidung des Modell-erstellers, der Begriffe der Systemtheorie (Mathematik, Kybernetik, Regelung, Struktur, Verhalten etc.) verwendet, um einen herausgegriffenen Bereich aus der vorhandenen, geplanten oder auch nur gedachten Realität (Gegenstandsbereich ist hier Technik im erweiterten Sinne) als System zu beschreiben. Modelle der Technikwissenschaften unterscheiden sich von den allein beschreibenden theoretischen Modellen der Physik in ihrer Breite, die Gedanken, Bewertungen, Entscheidungen und damit auch die zu verfolgenden Ziele einschließt.

Der Inhalt einer Sachlage wird im Modell auf Objekte und Prozesse mit spezifischen Attributen abgebildet, deren Verhalten festgelegten quantifizierbaren Regeln folgt. Die Wechselwirkungen zwischen den Objekten und die daraus folgenden Ereignisse in den Prozessen sind folglich im Modell berechenbar. Die Beeinflussung des Verhaltens der gegebenen Sachlage und der geplanten Artefakte durch ihre Umgebung wird im Modell mithilfe vorab festgelegter Randbedingungen beschrieben. Beispiele solcher Randbedingungen sind Lasten und Lagerungen für Bauwerke und Maschinen. Das Verhalten eines Modells zu einem gegebenen Zeitpunkt kann seine Randbedingungen in der Zukunft verändern. So können Auflager von Konstruktionen, die bei Druckbeanspruchung wirksam sind, ausfallen, wenn durch Eigenschwingungen Zugkräfte am Lager auftreten. Diese Änderung der Randbedingungen beeinflusst das Verhalten der Konstruktion. Für die Sachlage und ihre Umgebung gibt es keine Randbedingungen, da Sachlage und Umgebung in der Welt eine Einheit bilden. Die Auswahl der im Modell zu berücksichtigenden Randbedingungen sind

Festlegungen, die dem Ermessen des Modellbildners folgen oder durch Normen vorgegeben sind.

Jedes Modell abstrahiert in unterschiedlichem Ausmaß. Wird ein für das Verhalten der Sachlage bedeutendes Phänomen nicht in das Modell übernommen, so ist das Modell in hohem Maße unangemessen. Die Erfahrung zeigt, dass die nicht ausreichende Vollständigkeit des Modells die Ursache vieler folgenschwerer Unglücke im Ingenieurwesen ist. Typisch für solche Unglücke ist das Versagen der Bogenstaumauer Barrage de Malpasset nahe Fréjus an der Côte d'Azur. Sie wurde 1959 infolge des Versagens ihres linken Widerlagers vollständig zerstört. Ursache war der Kluftwasserdruck in einer tektonischen Störung im Untergrund, die nicht direkt unter der Mauer lag und bei der Planung der Sperre nicht erkannt wurde. Eine 40 Meter hohe Flutwelle tötete mehr als 400 Menschen und zerstörte zwei Ortschaften sowie weite Teile von Fréjus.

Die Technikwissenschaften müssen die späteren Verwendungskontexte ihrer Ergebnisse im Blick behalten. So besteht die Aufgabe des Ingenieurs nicht nur darin, einzelne Variablen unter präzise festgelegten Randbedingungen möglichst genau vorherzusagen. Vielmehr müssen die Technikwissenschaften den Ingenieur dazu befähigen mit möglichst hoher Wahrscheinlichkeit zu erreichen, dass die von ihm gestalteten Artefakte und Prozesse unter allen auftretenden äußeren Einflüssen brauchbar und sicher sind. Der Ingenieur muss bei seinen Entscheidungen berücksichtigen, dass die Rahmenbedingungen tatsächlich niemals vollkommen bekannt sind und ihre Festlegung eine Annahme ist. Deshalb müssen Wechselwirkungen zwischen dem inneren Verhalten eines Modells und seinen Randbedingungen weitgehend abgebildet sein.

Modellbildung wird meist prospektiv betrieben. Das bedeutet, dass man nicht erst ein Modell von einer schon bestehenden technischen Einrichtung anfertigt, um beispielsweise Bewertungen anzustellen oder Sicherheitsaussagen machen

zu können, sondern dass man zu einer Modellvorstellung ein entsprechendes Objekt entwerfen möchte. Eine der technischen Gestaltung vorgängige und begleitende Aufgabe der Technikwissenschaft ist es daher, formale, das heißt meist mathematisch beschriebene, aber auch manchmal intuitive und anschauliche Konstruktionen zu entwerfen, die zusammen mit der zugehörigen Theorie das Verhalten des Modells in abstrakter Weise simulieren können. Zu einem vorgegebenen Modell sind dann eine ganze Anzahl möglicher, verschieden komplex strukturierter Konstruktionen zu betrachten. Bei dieser Aufgabenstellung ist die Technikwissenschaft noch deskriptiv, sofern sie sich an den gerade vorhandenen Modellen, also am Stand der jeweiligen Technik orientiert. Ihr gegenüberzustellen wäre eine prospektiv orientierte Technikwissenschaft, die notwendigerweise präskriptiv ist. Sie entwickelt formalwissenschaftliche Konstruktionen und zugehörige Theorien und schlägt diese als Denkgrundlagen für die Konstruktion von Objekten und Prozessen bzw. deren Modellen vor. Hier ist auch die Nahtstelle zwischen Theorie und Gestaltung zu sehen. Denn es geht darum, möglichst „rationale“ Konstruktionen auszuführen, das heißt, aussichtsreiche Objekte zu konstruieren, zu bauen, anzuwenden und dazu gehörende Theorien aufzustellen, um die Chancen für eine gewünschte Zielerreichung abschätzen zu können. Damit ist die Gestaltungsaufgabe als Leitidee immer schon im Hintergrund gegenwärtig.

Nun gibt es Ingenieuraufgaben, die nur durch Beurteilung des dynamischen Verhaltens eines Systems gelöst werden können. Darum ist im Rahmen der prospektiven Modellbildung in den letzten Jahrzehnten insbesondere für Prozesse eine fruchtbare eigenständige Methode entwickelt worden, die Computersimulation. Sie erlaubt, mit speziellen Programmen Prozessverläufe, also dynamische Vorgänge, prognostisch unter jeweils unterschiedlichen Randbedingungen virtuell sichtbar zu machen. Dieses gilt beispielsweise für die Modellierung der Belastung eines Bauwerks durch die Bodenschwingungen eines Erdbebens. Zweck der Simulation eines Systems ist es, die für seine Verwirklichung

wesentlichen Verhaltensmerkmale zu erkennen und diese so zu bestimmen, wie es den gewünschten Zielen (einschließlich der Vermeidung unerwünschter Nebenfolgen) am besten entspricht. Die Hauptschwierigkeit besteht bei Simulationsmodellen in der Wahl einer geeigneten Menge zu untersuchender Zeitverläufe der Randbedingungen sowie der Bestimmung der Verhaltensmerkmale durch Analyse der Simulationsergebnisse. Simulationen reichen heute von der Darstellung rein technischer Alternativen über Varianten dynamischer Systeme bis zur Erfassung von Alterungsprozessen etwa einer Maschine, ansatzweise bereits bis zu Aussagen über mögliche gesellschaftliche Auswirkungen, wenngleich dort mit großer Unschärfe.

Das Ergebnis einer Modellbildung – dies gilt auch ganz allgemein – hängt in empfindlicher Weise nicht nur davon ab, welche Kenntnis der Modellbildner von dem abzubildenden Gegenstandsbereich hat und über welche Daten er verfügt, sondern auch davon, welche Verfahren der Modellbildung, die oftmals computerunterstützt sind, verfügbar sind und beherrscht werden. Dabei sind beispielsweise die formalen Ähnlichkeiten von Softwareentwicklung und der herkömmlichen Arbeitsschritte bei der klassischen Konstruktions-tätigkeit verblüffend hoch. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass eine selektive Verfügbarkeit von der Präferenz zu bestimmten Werkzeugen auch zu bestimmten Präferenzen bei der Modellbildung führen kann.

Es stellt sich die Frage, bis zu welchem Grad Modelle ihrem Zweck und Gegenstand angemessen sein können. Viele künstliche Objekte können mit befriedigenden Modellen abgebildet werden, da sich ihre Funktion aus erprobten physikalischen und chemischen Gesetzen ergibt, ihre Form und materielle Zusammensetzung aus der Kenntnis dieser Gesetze folgen und die Artefakte unter kontrollierten Bedingungen aus künstlichen Materialien hergestellt werden. Allerdings arbeitet man auch dabei mit unvollständigem Wissen. Schwachstellen des Modellierens künstlicher Systeme sind zudem variante Zielstellungen und

Verwendungskontexte, wie beispielsweise der Elchtest für Automobile gezeigt hat. Es geht dabei um die Erfassung der Randbedingungen und ein adäquates Verständnis technischer, sozialer wie organisatorischer Einflussgrößen, zum Beispiel Benutzerverhalten, Missbrauchsmöglichkeiten, Management von Energie-, Abfall- und Ersatzteilversorgung, Organisation präventiver Instandhaltung. Die Gesamtheit der zum Funktionieren eines technischen Artefakts notwendigen weiteren technischen und organisatorischen Strukturen (Ko-Systeme) kann man organisatorische Hülle nennen. Selbst für vertraute künstliche Objekte kann daher die Vollständigkeit der Modelle nicht garantiert, sondern nur angestrebt werden.

Wesentlich geringer ist in der Regel der Vollständigkeitsgrad von Modellen, die wichtige natürliche Komponenten enthalten. Dies zeigt sich beispielsweise bei Bogenstaumauern. Ein großer Teil der Verformungen, die das Tragverhalten der Mauer bestimmen, finden im Untergrund infolge des Gewichts des gestauten Wassers und der Sickerströmung statt. Tektonische Klüfte und Schichten mit niedriger Festigkeit sind potenzielle Schwachstellen. Selbst sorgfältige und aufwändige geotechnische Untersuchungen sind nicht ausreichend, um absolute Gewissheit über den Untergrund zu gewinnen. Auch ist die dynamische Modellierung bewegter Maschinen bis heute nur annäherungsweise möglich, weil beispielsweise die Dämpfungsparameter in den Kontaktstellen der Komponenten oder auch in den Materialien selbst nur experimentell empirisch erfasst werden können. Sie entziehen sich einer physikalisch und mathematisch exakten Berechnung und verändern sich darüber hinaus während des Betriebs der Maschinen. Auch die Handhabung technischer Systeme durch den Menschen wird in Modellen untersucht, beispielsweise um Störfälle zu begrenzen.

Ein weiteres Problem besteht darin, die heterogenen Wissensbestände unterschiedlicher Herkunft in Modellen zu integrieren, die der Komplexität des Untersuchungsgegenstands und der Komplexität der Frage- und Zielstellungen

adäquat sind. So spielen bei einem Projekt zur Entwicklung eines Mautsystems nicht nur der sensorische, daten- und softwaretechnische Stand der Technik und der Wissenschaft eine Rolle, sondern auch organisatorische, wirtschaftliche, politische und rechtliche Anforderungen. Die technikwissenschaftlichen Modelle müssen also ein hohes Maß an Ganzheitlichkeit und damit Komplexität aufweisen, was sie aber wiederum anfälliger für Unsicherheiten der daraus ableitbaren Aussagen macht. Dieses Zusammenspiel von Erfahrung, Gestaltung und wissenschaftlichen Disziplinen macht die Modellbildung in den Technikwissenschaften mithilfe der Abstraktion letztlich zu einer Kunst.

Die Forderung nach ausreichender Vollständigkeit der Modelle ist eine besonders wichtige Forderung an die Technikwissenschaften. Leider gibt es keinen absoluten Maßstab für Vollständigkeit. Ein Beispiel für unvermeidbare Unvollständigkeit sind Modelle für das Verhalten von Bauwerken bei Erdbeben. Die Tragkonstruktionen werden vorwiegend durch Horizontalbeschleunigungen ihrer Fundamente beansprucht, die durch komplexe stochastische Ereignisse erregt werden: Freisetzung von Energie am Herd des Bebens, Übertragung der Energie durch verschiedenartige Schichten, Oberflächenwellen sowie Wechselwirkung zwischen Bauwerk und Baugrund. Diese Abläufe können mit deterministischen Modellen nicht vollständig beschrieben werden. Die stochastischen Modelle sind zwangsläufig unvollständig und führen zu dem Konzept des unvermeidbaren Restrisikos.

Der Zwang zur Nachhaltigkeit hat die Ingenieure zum Denken in Lebenszyklen von Artefakten und Prozessen geführt. Es genügt nicht mehr, das Verhalten von Systemen zum Zeitpunkt ihrer Inbetriebnahme mit Modellen zu beschreiben und zu untersuchen, denn der Zustand der Artefakte und Prozesse, die in Modellen abgebildet sind, ist zeitabhängig. Die Zukunft ist jedoch nicht vorhersehbar. Folglich ist es auch nicht möglich, die Vollständigkeit eines Modells in der Zukunft zu garantieren. Veränderungen in einer Maschine während des Betriebs, wie etwa Verschleiß oder Ermüdung

der Oberflächen an den Kontaktstellen, verändern das Verhalten der Maschine. Sie müssen von Ingenieuren abgeschätzt werden. Die Abschätzung beinhaltet auch Aussagen über die Restlaufzeit und die Sicherheit verschlissener und ermüdeter Maschinen. Die Technikwissenschaften sind gefordert, zuverlässige Modelle für Prozesse zu entwickeln, die über lange Zeiträume ablaufen. Die Unvollständigkeit der Modelle darf nicht zu der Folgerung führen, dass die Brauchbarkeit von Modellen unwichtig wäre. Das Gegenteil ist der Fall. Damit das unvermeidbare Restrisiko möglichst klein ist, müssen alle erfassbaren Einflüsse annähernd richtig abgebildet sein. Ein Modell ist brauchbar, wenn sein Verhalten unter den erfassten Einflüssen bei vergleichbaren Bedingungen nicht wesentlich vom tatsächlichen Verhalten der Artefakte und Prozesse abweicht.

Der unvermeidliche Umgang mit unvollständigen Modellen ist eine der großen Herausforderungen in der Praxis des Ingenieurwesens. Als wissenschaftliche Grundlagen für diese Aufgabe werden stochastische Modelle, Risikoanalysen und entscheidungstheoretische Verfahren eingesetzt. Durch systematische Untersuchung möglicher Situationen und der Einflüsse verschiedenartiger Phänomene in diesen Situationen gelingt es, Einsicht in die relative Bedeutung der relevanten Einflussfaktoren zu gewinnen. Voraussetzung bleibt allerdings, dass das Modell für die gewünschten Zwecke ausreichend ist. Es ist ein Merkmal der Innovation, dass hinreichend vollständige Modelle für sie erst entwickelt werden müssen. Für viele der Aufgaben des Ingenieurwesens wäre heute das durch Unvollständigkeit der Modelle verursachte Restrisiko ohne die Technikwissenschaften nicht tragbar.

Neben der Symbiose mit den Technikwissenschaften beeinflussen viele weitere Faktoren den Erfolg im Ingenieurwesen. Die meisten dieser Faktoren ergeben sich aus der Beziehung des Ingenieurs zur Gesellschaft. Sie liegen im ästhetischen, ethischen, politischen, wirtschaftlichen, finanziellen und rechtlichen Bereich. Wandel in der Gesellschaft führt unausweichlich zu Wandel im Ingenieurwesen.

4.3 EXPERIMENT UND TEST

Technisches Wissen hat oftmals die Form von Faktenwissen, das – sofern ihm keine Bestandteile gesetzesartigen Wissens beigemengt sind – den Einzelfall oder das Einzelereignis repräsentiert. Der Einzelfall oder das Einzelereignis ist zum einen die Voraussetzung zur Gewinnung gesetzesartiger Aussagen (erklärendes Wissen kausaler wie praktischer Art) durch induktive Schlüsse, zum andern aber auch Ausgangspunkt und entscheidendes Kriterium für das Handeln. Faktenwissen über die Welt wird durch Experimente und die operative Erfahrung erzeugt. Durch experimentelle Erfahrung gewonnenes Wissen kann im Rahmen einer Theorie beschrieben werden, die Hypothesen in Form von Aussagen wie „Immer wenn x, dann y“ oder „Für alle x gilt y“ (sogenannte universale Urteile) enthält.

Zentraler Begriff bei Untersuchungen im theoretisch-empirischen Bereich, soweit sie theoriegeleitet empirisch vorgehen, ist das **Experiment**. Das theoriegeleitete Experiment setzt die Herstellung der Bedingungen voraus, unter der aus einer Gesetzesaussage oder Hypothese eine konkrete Voraussage getroffen werden kann. Im Experiment werden die Anfangs- und Randbedingungen eines Prozesses mit den entsprechenden und unvermeidlichen Ungenauigkeiten präpariert, also ins Werk gesetzt. Dann wird der Ablauf des Prozesses beobachtet. Die Beobachtung wird mit der Prognose verglichen, die aufgrund der Kenntnis der Rand- und Anfangsbedingungen und dem Gesetz, das heißt eines Zusammenhangs, der das Verhalten und die Dynamik beschreibt, „errechnet“ werden kann. Den Rand- und Anfangsbedingungen für die Lösung der Dynamik durch ein Kalkül entsprechen die Herstellungsbedingungen im Experiment, der Berechnung der Dynamik und der numerischen Bestimmung des Ergebnisses entsprechen der Prozess und dessen Beobachtung. Empirie kann damit gesetzesartige Aussagen falsifizieren, wenn Beobachtung und theoriegestützte Prognose auseinanderfallen.

Im Bereich der Begründung technischer Praxis entspricht die Herstellung der Randbedingungen dem Zusammenfügen bereits schon funktionierender, gegebenenfalls elementarer Bauteile zu einem Gesamten, das dann hinsichtlich einer bestimmten erwarteten technischen Funktion getestet werden soll. Demnach ist das Experiment vom Test wohl zu unterscheiden: Im theoriegeleiteten Experiment werden durch die Verwendung einer Theorie (vorliegend als hypothetisches Wissen in Form von Konditionalsätzen „wenn – dann“), durch die prinzipiell wiederholbare Herstellung der Anfangs- und Randbedingungen und durch die Beobachtung Prozesse angestoßen, deren reproduzierbarer Ablauf aufgrund des Wissens über bestimmte angenommene Gesetzmäßigkeiten zu erwarten ist. Technikwissenschaften beschäftigen sich auch mit naturalen Prozessen, ein Experiment kommt daher auch in den Technikwissenschaften vor. Man kann spezielle Prozesse durch wiederholbare Herstellung von Anfangs- und Randbedingungen anstoßen, deren zugrundeliegende Gesetzmäßigkeiten nicht bekannt sind, sondern bei dem nur eine gewisse Regularität vermutet wird. Solche Experimente, die lediglich mit Artefakten durchgeführt werden, könnte man als technische Experimente bezeichnen.

Beim **Test** im Bereich der Begründung technischer Praxis werden hingegen aufgrund einer gefundenen Regel ein Zusammenbau, eine Komponente und dergleichen auf die Erfüllung von Funktionen erprobt, die vorher zusammen mit den Rand- und Anfangsbedingungen vermutet worden sind. Eine zu testende Regel stellt eine Funktionsvermutung dar. Im Mittelpunkt steht also nicht der natürliche oder induzierte Ablauf oder Prozess, sondern die Frage, ob die zu testende Regel in der praktischen Umsetzung effektiv ist. Die Frage ist, ob die technische Handlung in ihrer Durchführung oder das Arrangement der zusammengesetzten Funktionen durch den Zusammenbau von Bauteilen zu dem gewünschten Erfolg geführt hat. Der Messung im technikwissenschaftlichen Experiment steht auf der Seite des technischen Tests eine quantitative Bestimmung der Erfüllung

von Funktionskriterien entgegen. Der Interpretation des Ergebnisses eines Experiments im Rahmen der wissenschaftlichen Theorie als Bestätigung einer Vorhersage entspricht dann auf der Seite des Tests einer technologischen Theorie die Erfüllung aller vorher festgelegten Funktionalitäten, und zwar im Rahmen einer Theorie über den Gegenstandsbereich der Zwecke oder einer ganzen Klasse von Zwecken.

Beim technischen Test werden daher eine konkrete Zusammenstellung oder ein konkreter Zusammenbau daraufhin untersucht, ob sie eine vorab definierte Funktion erfüllen, es wird dabei keine Generalisierbarkeit angestrebt. Im Experiment wird eine Theorie oder eine Regelmäßigkeit daraufhin untersucht, ob sie sich zu einem bestimmten Grad bewährt bzw. mit welcher Wahrscheinlichkeit sie zutrifft. Hier wird der Blick immer vorrangig auf die Möglichkeit einer Verallgemeinerung gerichtet.

Beim Test wird eine Regel unter der Bedingung der vollständigen Herstellung der Rand- und Anfangsbedingungen (einschließlich der Reihenfolge der notwendigen Handlungen am Artefakt) als effektiv bezeichnet, wenn die gewünschte Funktion erfüllt ist. Dazu muss nicht unbedingt der komplette Verlauf eines Prozesses vorhergesagt werden können. Allerdings reicht es nicht hin, ein singuläres Ereignis zu testen, da der Gebrauch von Technik, der im sozialen Kontext meist ein vielfacher Gebrauch ist, die Replikation von Baubarkeit und von Funktionen im Sinne von Zuverlässigkeit erfordert. Ein einmaliger Testerfolg „beweist“ ebenso wenig wie ein einmaliger „Fehlstart“.

Wenn sich eine Regel als zuverlässig effektiv erweist, dann kann sie häufig und wiederholbar zum Einsatz kommen. Keine Regel ist hundertprozentig effektiv im Sinne ihrer sukzessiven Anwendung. Umgekehrt zeigt ein fehlgeschlagener Test noch nicht, dass eine Regel nicht effektiv ist. Beim Test wird also nicht geprüft, ob in einem Einzelfall ein Effekt unter ein Gesetz subsummiert werden kann, sondern es wird geprüft, ob eine Durchführung, die eine

solche Aussage bezeichnet, tatsächlich effektiv ist und die Durchführung zum erwünschten Erfolg führt oder nicht. Dies setzt voraus, dass die Bedingung vor dem Test auch tatsächlich in die Praxis umgesetzt wird, sonst kann man die Effektivität nicht testen.

Beispiel 1: Vorgehensweise beim Experiment.

Aus der Beobachtung der Dynamik elektrischer Ladungen in Festkörpern wird die Hypothese gebildet, dass bei einem Übergang von einem p- in einen n-Halbleiter sich eine Grenzschicht ausbildet, die je nach Stromrichtung schrumpft oder wächst. Aus dieser Hypothese wird für bestimmte Dotierungen und Kristallgrößen eine Voraussage berechnet. Das Experiment stellt die theoretisch angenommenen oder ausgewählten Rand- und Anfangsbedingungen in der Realität her (Bau eines p-n-Übergangs) und führt eine Messung der Stromstärken und Spannungen und Ladungstransporte durch. Der Vergleich zwischen beobachteter und vorhergesagter Größe erlaubt Aussagen über die Validität der Hypothese, zum Beispiel über die Dicke der Grenzschicht oder die asymmetrische Durchlässigkeit bei Ladungstransport.

Beispiel 2: Vorgehensweise beim Test

Aufgrund der Hypothese, dass die schlecht leitende Schicht zwischen einem p- und n-Halbleiter sich je nach angelegter Spannungsrichtung vergrößert und verkleinert, wird die Funktionsvermutung aufgestellt, dass Strom in der einen Spannungsrichtung eher durchgelassen wird als in der anderen, sodass man auf diese Weise eine Gleichrichterwirkung erhalten kann. Es ist also ein p-n-Übergang in eine

Schaltung einzubauen, in der Wechselspannung in Gleichstrom umgewandelt wird, indem man zum Beispiel eine Röhrendiode durch eine solche Anordnung ersetzt. Dann wird die Gleichrichterwirkung der Anordnung gemessen. Sofern ein theoretisches Wissen (zum Beispiel Leitungstransport in Halbleitern) über den Prozess verfügbar ist, kann man versuchen, auch Vorhersagen zu machen und mit dem Ergebnis zu vergleichen. Zur Feststellung der Effektivität der Regel *p-n-Übergänge können zur Gleichrichtung verwendet werden* ist dieses theoretische Wissen nicht unbedingt erforderlich.

Eine methodische Einschränkung ist zu machen: Tests können an bestehenden großen technischen Anlagen nach ihrer Herstellung oder Installation oftmals nicht mehr vorgenommen werden. Anlagen als Ganzes können ab einer bestimmten Größenordnung vor ihrem Einsatz nicht in einem Labor untergebracht werden. Man muss sich also darauf verlassen können, dass aus der Zuverlässigkeit der Komponenten und dem Zusammenbau in einem abgesicherten Verfahren eine zuverlässige Gesamtanlage entsteht. Gewissheit entsteht nur über die Prüfung vor Ort, die dann mit der Bewährung zusammenfallen muss. Das Problem der Testbarkeit im Zusammenhang mit den Größenordnungen (Maßstabsproblem) ist auch in den Technikwissenschaften noch nicht hinreichend untersucht. Wenn ein materieller Test unmöglich ist (aus ökonomischen, sicherheitstechnischen oder ethischen Gründen), tritt an seine Stelle die Simulation, sofern ein geeignetes Modell zur Verfügung steht. Die Voraussetzungen für die Brauchbarkeit von Simulationsergebnissen sind jeweils fachspezifisch höchst unterschiedlich.

5 GESTALTEN IN DEN TECHNIKWISSENSCHAFTEN

5.1 TECHNIKWISSENSCHAFTEN UND TECHNISCHE PRAXIS

Gestaltung ist Sache der Technik, Erforschung der Gestaltungsmöglichkeiten ist Aufgabe der Technikwissenschaften.

Eine technische oder technisch-organisatorische Funktion lässt sich durch viele Möglichkeiten ins Werk setzen. Man kann einen Türöffner mit einer Klinke (europäisch) oder mit einem Knauf versehen (anglo-amerikanisch). Die Funktion bleibt dieselbe. Aus den physikalischen, technischen und organisatorischen Gegebenheiten allein ist die eine oder andere Gestaltungsmöglichkeit nicht zwingend, kann also nicht im strengen Sinne „abgeleitet“ werden. Gerade im gestalten- den Bereich haben es die Technikwissenschaften immer mit einem Spektrum von Optionen zu tun. In diesem Bereich der Gestaltung liegt auch der besondere Ort der Kreativität, aber auch der Ort, an dem Normen und Werte einer Gesellschaft konkret auf die Technikgestaltung einwirken.

Die Technikwissenschaften versuchen dem einzelnen Ingenieur für die Arbeit mit dem jeweils zu erstellenden oder auch schon bestehenden Modell des Artefakts (als technischem Gegenstand) eine Hilfestellung über eine geeignete Theorie anzubieten. Die Technikwissenschaften unterstützen Gestaltungsvorschläge; ob sich diese bewähren, zeigt sich erst in der technischen Praxis. Zur Erforschung dieser Gestaltungsmöglichkeiten unterteilt sie dieses Arbeiten je nach Stellung des Modells im Gestaltungsprozess (Gestaltungskette) in Modellsynthese, Modellanalyse und Modelloptimierung. Darüber hinaus gibt es eine weit größere Anzahl von Modellfunktionen, also Zwecke, wofür Modelle erstellt und benutzt werden. Dabei ist zwischen Modellen, die nur beschreiben (deskriptive Modelle) und präskriptiven Modellen, also Modelle, die ohne weiteres in eine Bauanleitung transformiert werden können, zu unterscheiden.

Bei der **Modellsynthese** besteht die Hilfestellung der Technikwissenschaften vor allem darin, einen möglichst

vollständigen Katalog gedanklicher Vorstellungen über herzustellende Gegenstände zusammen mit einer für die Problemstellung relevanten Theorie aufzubereiten und Verfahren für den Zusammenbau von Artefakten zu entwickeln. Dabei sind alle Nebenbedingungen zu berücksichtigen, die für die Realisierung der Modelle in der Wirklichkeit wesentlich sein können. Die folgende Situation ist für die Problemstellung in der Modellsynthese typisch: Es geht darum, zu vorgegebenen oder gewünschten Eigenschaften, also zu einem vorgegebenen Schema von Problemstellungen und zugehörigen Lösungen, das gesuchte Modell so festzulegen, dass es diese Eigenschaften sicherstellt. Wenn dies geschehen ist, kann die Einrichtung einer Wirklichkeit, zum Beispiel der Bau eines Prototyps entsprechend dem gewonnenen Modell vorgenommen werden. Gegeben seien beispielsweise die Anforderungen an einen Dieselmotor in Form eines Pflichtenhefts. Es muss ein Modell, das heißt der Satz der Entwurfsunterlagen für diesen Motor, „synthetisiert“ werden. Dazu ist das Angebot der Technikwissenschaften an gedanklichen Vorstellungen über herzustellende Gegenstände und Verfahren zu nutzen. Zunächst ist es notwendig, das vorgegebene Schema von Problemstellungen und die zugehörigen gewünschten Lösungen von der „Modellsprache“ in die Sprache der technischen Vorstellungen oder des Entwurfs zu übersetzen. In obigem Beispiel werden die Fragestellungen des Pflichtenhefts und die unterschiedlichen Motorkonzepte in Fragestellungen, die sich an einem Carnot-Prozess orientieren, transformiert. Danach ist eine Kombination von Vorstellungen zu finden, die einerseits genau dieses Schema erzeugt, andererseits aber noch Eigenschaften erlaubt, die sie für die spätere Realisierung des Modells als geeignet erscheinen lässt. Die Situation der Modellsynthese ist für Aufgabenstellungen eines Ingenieurs typisch. Diese Umsetzung aus der Modellwelt in die Technikwissenschaften und zurück ist hier nicht als Selbstzweck zu verstehen. Vielmehr sind mit dieser Transformation der Vorstellungs-/Konkretisierungswelten ganz praktische Erwartungen verbunden. Die Technikwissenschaften stellen sich daher die Aufgabe, Konstruktionsmöglichkeiten mit den verschiedensten strukturellen Eigenschaften zu betrachten.

Das eröffnet die Möglichkeit, zu jedem Modell eine für die gerade vorliegenden Fragestellungen maßgeschneiderte Konstruktion anzugeben. Dementsprechend ist dann auch die zugehörige Theorie den Fragestellungen angepasst.

Bei der **Modellanalyse** besteht die Hilfestellung der Technikwissenschaften vor allem darin, einen hinreichenden Katalog von Eigenschaften von bereits bestehenden Artefakten oder schon ausgearbeiteten Vorstellungen über herzustellende Gegenstände aufzubereiten und sie mit einer hierfür relevanten Theorie zu vergleichen. Dazu muss sie Korrespondenzregeln angeben, die den Bezug zwischen bestehenden Artefakten und Vorstellungen über mögliche Artefakte und den aus der Theorie folgenden Modellen herstellen. Vor allem zwei Situationen sind hier für das Vorgehen typisch, die auch zwei Methoden repräsentieren:

Methode 1: Gegeben sei ein Modell (zum Beispiel die Entwurfsunterlagen eines Dieselmotors oder die Beschreibung eines schon existierenden Dieselmotors) und darauf bezogene Problemstellungen (Drehzahl-/Leistungs-/Verbrauchs-Verhalten etc.). Gesucht seien die Lösungen, die das Modell zu den einzelnen Problemstellungen zu liefern imstande ist (Leistungscharakteristiken etc.). Eine für dieses Modell geeignete technikwissenschaftliche Vorstellung (beispielsweise ein „spezieller Carnot-Prozess“) kann hier wesentlich zur Auffindung der Lösungen für die gegebenen Problemstellungen beitragen. Eine solche Vorgehensweise ist dann zweckmäßig, wenn mit dieser Vorstellung eine leistungsfähige Theorie (eben beispielsweise die technische Wärmelehre) mitgeliefert wird und daraus Methoden resultieren, welche den zum Modell gehörigen Methoden, die immer nur situativ entstehen bzw. entwickelt werden können, überlegen sind.

Methode 2: Gegeben sei ein Modell (beispielsweise wieder die Entwurfsunterlagen eines Dieselmotors oder die Beschreibung eines schon existierenden Dieselmotors),

jetzt aber zusammen mit einer Menge von gewünschten Lösungen (zum Beispiel Dieselmotoren mit spezieller Aufladung oder spezieller Kühlung). Gesucht ist die Menge von Problemstellungen (beispielsweise möglichst zuverlässiger Einsatz in Wüstenzonen mit hohem Staubaufkommen und schlechter Treibstoffqualität), welche genau diese Lösungen erfordern. Diese Situation tritt immer dann auf, wenn bei bekannten Wirkungen nach deren Ursachen gefragt wird. Auch hier kann eine zum Modell „spezielle Aufladung“ gehörige Vorstellung „spezieller Carnot-Prozess“ eine Hilfe darstellen.

Bei der **Modelloptimierung** (vom Modell zu Beginn des Gestaltungsprozesses bzw. der Gestaltungskette bis hin zum verbesserten Modell am Ende) existiert bereits eine Vielfalt möglicher Verhaltensweisen zum Beispiel aufgrund von Simulationen und/oder der möglichen Strukturformen. Genauer müsste man von Verbesserung des Modells sprechen. Hier ist von Interesse, welche bestmöglichen Veränderungen vorgenommen und welche Theorien auf die Attribute des Modells abgebildet werden können. Dabei spielt die Art des Lösungsprinzips eine wichtige Rolle. Genauso wichtig ist die aus der Umwelt des Artefakts stammende Zielfunktion und wie diese formuliert wird.

In Anlehnung an die Systemtheorie differenzieren die Technikwissenschaften zweckmäßig nach Verhalten (Dynamik) und Struktur. Die Theorie, die sich mit den verschiedenen Verhaltensweisen befasst, wird in diesem Kontext Verhaltenstheorie genannt. Zu ihr gehören das Input-Output-Verhalten, das Stabilitätsverhalten und das Lernverhalten. Mit der Erfassung der Struktur eines gegebenen oder vorgestellten technischen Gebildes setzt sich die Strukturtheorie auseinander. Sie untersucht die einzelnen Teilstrukturen und zeigt deren Beziehung zum Systemganzen auf. Bei Vorliegen mehrerer Gebilde ist die Frage interessant, welche Kombinationsmöglichkeiten vorhandener Gebilde zur erfolgreichen Entstehung eines neuen Geräts oder Einrichtung führen. Ein Beispiel für eine Theorie, die sich

mit diesen oder ähnlichen Problemen beschäftigt, ist die Schaltungstheorie. Sie ist für die Zusammensetzung komplexer Gebilde aus elementaren Bausteinen von grundlegender Bedeutung. Im Rahmen dieser Theorien hat der Ingenieur – also der Anwender der Theorie – zu überprüfen, ob die Aussagen, die er über die Modelle seiner Artefakte und damit über die Artefakte selbst macht, zutreffen und er muss sie auch begründen können. Diese Theoriemenge ist der Beitrag der Technikwissenschaften zum Stand der Technik, an dem sich der Ingenieur zu messen und an dem er sein Handeln ausrichten hat. Bewegt sich der Ingenieur mit seinen Modellen und seinen Modellaussagen innerhalb dieses Rahmens – das heißt, wenn er sein Modell auf diese Vorstellungen wie auf existierende Artefakte funktional abbilden kann –, ist er seiner Sorgfaltspflicht nachgekommen (vgl. Kapitel 6). Deshalb sollte die Theoriemenge der Technikwissenschaften keine ungesicherte Hypothese, keine nicht belastbaren Vermutungen, keine nicht reproduzierbaren Einzelbeobachtungen enthalten. Vielmehr muss diese Theoriemenge nach bestem Wissen und Gewissen abgesichert und allgemein anerkannte Erkenntnis darstellen.

Die Verpflichtung der Technikwissenschaften besteht darin, die größtmögliche Sicherheit dieser Erkenntnis über geeignete Vorgehensweisen und Tatbestände zu gewährleisten. Dieser Anspruch gilt nicht nur für den Weg von der Funktionsvermutung über die Vorstellung über ein technisches Gebilde bis zum Modell und zum gebauten Artefakt, sondern generell für den Einsatz aller technischen Produkte in der industriellen Praxis bzw. im täglichen gesellschaftlichen Leben bis zum Ende der jeweils angezeigten Lebenszeit, das heißt einschließlich Entsorgung und Recycling. Dabei wird stillschweigend vorausgesetzt, dass die Vorschriften und die Anwendungsbedingungen der verwendeten Theorie für Modell und Realität befolgt wurden. Zu den Verpflichtungen der Technikwissenschaften gehört weiterhin, die Erkenntnis ständig voranzutreiben und die erforderlichen Ressourcen für eine Abwägung der Prioritäten bei der Gestaltung zu benennen.

Vor allem ist es hier die Aufgabe der Technikwissenschaften und ihrer Ausrichtungen bzw. Einzeldisziplinen

- gedankliche Vorstellungen über herzustellende Gegenstände zu erarbeiten und systematisch ihr Verhalten zu beschreiben,
- mögliche Strukturen und Strukturformen zu erarbeiten und diese systematisch miteinander zu vergleichen,
- Vorstellungen, Strukturen und Theorien an Modellen oder der Realität zielgerichtet und begründet zu erproben,
- aufzuzeigen, wie derartige Vorstellungen in Verfahren synthetisiert und für Anwendungsklassen zielführend und effizient eingesetzt werden können sowie
- die Auswahl aus den gegebenen Möglichkeiten sowie die Grenzen der technikwissenschaftlichen Erkenntnis für die Gesellschaft verständlich zu machen.

Daraus folgt unmittelbar, dass sich die Technikwissenschaften in besonderem Maße an einer theoretischen und praktischen Form des „Zutreffens“ orientieren müssen. Diese Form wird danach bestimmt, ob sie mit einer als gewiss angenommenen Theorie über einen Gegenstandsbereich verträglich, aus dieser ableitbar oder durch sie rechtfertigbar ist. Sie ist dann im Rahmen dieser Theorie gültig. In den Technikwissenschaften ist dies – metaphorisch gesprochen – der „Stand der Technik“. Das heißt nicht, dass nur absolut gesicherte Erkenntnisse verwendet werden dürften, denn sonst wären wahrscheinlich kein Fortschritt und schon gar keine Fortschritte in den Technikwissenschaften möglich. Daher ist eine Hypothese als Hypothese, eine Funktionsvermutung eben als Vermutung, das heißt als nur teilweise gesicherte Erkenntnis, zu kennzeichnen. Auch eine Theorie ist immer mit der Angabe der Grenzen, in der sie gültig ist, darzustellen. Ebenso ist sorgfältig zwischen natürlichen Tatsachen (natürliche Eigenschaften, Naturgesetze) und institutionellen Tatsachen (ökonomische, politische, gesetzliche und soziale Rahmenbedingungen) zu unterscheiden. Bereits vorhandene Erkenntnisse dürfen weder negiert noch verschwiegen

werden. Versuchsergebnisse oder Versuchsannahmen dürfen selbstredend weder gefälscht noch verfälscht werden.

5.2 PROGNOSEN – METHODEN – GRENZEN

Ausgang für die Gestaltung von Artefakten und damit auch für den Entwurf geeigneter Modelle (siehe oben) sind Erkenntnisse, die sich aus zufälligen Beobachtungen von Regelmäßigkeiten ergeben können – meist sind es jedoch aus der Kenntnis wissenschaftlicher Hypothesen und von Naturgesetzen abgeleitete Funktionsvermutungen. Der Prognose im Experiment entspricht beim Test die Funktionsvermutung (vgl. Kap. 4.1). Prognosen im gestaltenden Bereich sind überwiegend Voraussagen über die Effektivität und – wenn möglich – Effizienz einer technisch zu realisierenden Funktion. Diese stellt den Vollzug eines Prozesses dar, der in der Natur unter den vorgegebenen Randbedingungen möglich ist und dessen Ergebnis gewünscht ist (Erfüllung der Funktion). Die Prognose – wenn auch immer sehr auf vereinfachenden Modellen aufbauend – ist hier notwendig und entscheidend für das Ins-Werk-Setzen einer technischen Funktion.

Im Falle eines Tests, der in Kap. 4.3 vom Experiment unterschieden wurde, wird eine Regel B per A unter der Bedingung einer hinreichenden Herstellung der Rand- und Anfangsbedingungen einschließlich der Reihenfolge der notwendigen Handlungen am Artefakt – sprich Bedienung –

als effektiv bezeichnet, wenn die gewünschte Funktion eintritt. Es genügt in den Technikwissenschaften also nicht, dass nur der Verlauf eines Prozesses vorhergesagt werden kann. Gefordert ist auch seine Wiederholbarkeit. Ist ein Prozess, der eine technische Funktion realisiert, bei einer weiten Klasse von Umständen wiederholt realisierbar, kann man dies als zuverlässiges Funktionieren bezeichnen. Umgekehrt zeigt ein fehlgeschlagener Test noch nicht, dass eine Regel nicht effektiv sei. Unter anderen Umständen oder bei veränderter Zielsetzung kann sich eine solche Regel durchaus als effektiv erweisen. Das bedeutet, dass auch die Empirie beim technischen Wissen anders strukturiert ist als beim naturwissenschaftlichen Wissen. Die Funktionsvermutung ist daher als eine qualitative Voraussage in den Technikwissenschaften anzusehen. Sie wird durch quantitative Prognosen ergänzt.

Es gibt generell in der Wissenschaft zwei Weisen, quantitative Voraussagen zu machen. Die erste, strukturoptimierende Vorgehensweise besteht darin, Gesetzmäßigkeiten des zu prognostizierenden Prozesses heranzuziehen, unter den gegebenen Rand- und Anfangsbedingungen aus der Lösungsmannigfaltigkeit die künftigen Zeitwerte, zu denen man den Zustand kennen möchte, einzusetzen und dann zu berechnen. Die zweite, verhaltensorientierte Methode ist, den Prozess lange zu beobachten, ihn in einer Zeitreihe darzustellen und die Zeitreihe mit einer geeigneten Funktion anzupassen.

6 VERANTWORTUNG

Technikwissenschaften sind, wie andere Handlungswissenschaften, eng mit der Praxis verbunden. Deshalb stellen sich in ihnen Wertungs- und Verantwortungsprobleme in besonderer Weise. Die Vorstellung, Wissenschaften seien ethisch neutral, weil sie nur Theorien entwickeln, hat sich ebenso als zu kurz greifend erwiesen wie die These, nicht der Ingenieur trage die Verantwortung für das von ihm entwickelte funktionstüchtige Artefakt, sondern allein der Anwender. Deshalb sind Fragen der Verantwortung auch Gegenstand der Technikwissenschaften.

Das erste Grundproblem, das sich bei der Frage nach der Verantwortung der Wissenschaft stellt, ist die Zuordnung zu der mehrstelligen Relation: Wer ist wofür weswegen gegenüber wem wie lange aufgrund welcher Werte und Maßstäbe verantwortlich? Dazu kommt die praktische Frage: Welche Sanktionsmöglichkeiten bestehen? Wenn man diese Kategorien kombiniert, kann man so unterschiedliche Belegungen für das Subjekt der Verantwortung, das Objekt der Verantwortung, den Grund, die Instanz und den Zeithorizont finden. Man wird dann feststellen, dass die Belegung für Subjekt, Objekt und Instanz der Verantwortung jeweils anders ausfällt und außerordentlich vielfältig ist. Trotzdem hat sich diese Diskussion als hilfreich erwiesen, da sie bewusst macht, dass man den Verantwortungsbegriff in der jeweiligen Situation und Problemlage spezifizieren muss. Es ist ein Unterschied, ob man zum Beispiel einen mittleren Angestellten in einem Produktionsbetrieb für einen Rückruf in der Automobilindustrie aufgrund eines Konstruktionsfehlers noch nach Jahren verantwortlich macht und Haftungsfragen oder strafrechtliche Sanktionen in Betracht zieht oder ob man etwa von einer gesamtgesellschaftlichen Verantwortung der Technikwissenschaft für Folgen der Technik oder für die Bildung wissenschaftlichen Nachwuchses spricht.

6.1 VERANTWORTUNG IN DEN TECHNIKWISSENSCHAFTEN

Zunächst stellt sich die Frage, ob das Subjekt der Verantwortung in der Wissenschaft die einzelne Person oder ein Kollektiv ist – im Sinne einer Gruppe von Entscheidung tragenden Personen wie Vorstände, Teams, Gremien bis hin zu Kabinetten und Parlamenten. Die Frage, ob ein Kollektiv Subjekt der Verantwortung sein kann, ist in der Ethik umstritten. Sie ergibt sich pragmatisch meist danach, welche Möglichkeiten zur Sanktion es tatsächlich gegenüber Kollektiven gibt, die über diejenigen hinaus bestehen, die Personen gegenüber zur Verfügung stehen: Bestrafung, zivilrechtliche Konsequenzen, Ausschluss aus der wissenschaftlichen Gemeinschaft, Anerkennungsverlust, Verlust der Arbeitsmöglichkeit etc. Kollektive Autorenschaft, wie sie in der Wissenschaft üblich geworden ist, ist auch mit der Verantwortungsübernahme durch jeden einzelnen Autor verbunden.

Unklar ist auch die Antwort auf die Frage nach der Instanz, also wem gegenüber Wissenschaftler verantwortlich sein sollen. Das lässt sich nicht von der Frage trennen, wofür ein Wissenschaftler oder ein wissenschaftliches Gremium verantwortlich sein soll oder sich verantwortlich fühlt. Das wissenschaftliche Ergebnis selbst kann kaum Objekt der Verantwortung sein, wohl aber die Qualität des wissenschaftlichen Ergebnisses nach den Standards wissenschaftlichen Arbeitens. Ob ein Wissenschaftler für die Produkte, die aufgrund einer Entdeckung nach einer gewissen technischen Entwicklung entstehen oder entstehen werden, Verantwortung trägt, ist umstritten. Ebenso wird kontrovers diskutiert, ob Wissenschaftler für die Folgen, die bei der Anwendung solcher Produkte entstehen, verantwortlich sind. Einige Physiker haben sich im Fall der militärisch genutzten Kernenergie zu dieser Verantwortung bekannt, andere haben eine solche Verantwortungsübernahme weit von sich gewiesen. Die Argumentation zeigt in diesem Falle auch die Abhängigkeit der

Beantwortungsversuche von der Rolle und dem Selbstverständnis des Wissenschaftlers und des Ingenieurs. Ein der Grundlagenforschung verpflichteter Wissenschaftler wird vielleicht für eine nachfolgende technische Entwicklung keine Verantwortung übernehmen wollen. Ein Technikwissenschaftler, ein Konstrukteur oder ein Industrieingenieur werden sich zwar für die Funktionsfähigkeit verantwortlich fühlen, zumeist jedoch nicht für die Entscheidung über den Einsatz oder Nichteinsatz einer Technik.

Zurück zur Instanz: Ein Grundlagenforscher würde sich eher der wissenschaftlichen Gemeinschaft (der Wissenschaft als Institution) gegenüber für die Qualität seiner wissenschaftlichen Arbeit verantwortlich sehen – daher unterwirft er sich den Regeln, Standards und gängigen Prüfprozeduren der *scientific community* (zum Beispiel Review-Verfahren bei Publikationen). Diese wiederum hat subtile Methoden der Sanktion entwickelt – von der Zurückweisung einer Publikation bis hin zum Ausschluss aus der wissenschaftlichen Gemeinschaft. Ein Ingenieur wird sich eher gegenüber seinem Auftraggeber, der Handwerker und Techniker direkt seinem Kunden verantwortlich fühlen. Diese wiederum sind durchaus sanktionsfähige Instanzen.

Letztlich ist der Grundlagenforscher geradeso wie der Ingenieur gegenüber der Gesellschaft verantwortlich, und dies etwa in Menschenrechtsfragen gar gegenüber der Weltgesellschaft. Deshalb liegt es auch im Interesse des Technikwissenschaftlers, sich im Bewusstsein der eigenen Verantwortung in die gesellschaftliche Diskussion einzubringen und dies als eine Verpflichtung anzusehen.

Der Verantwortungsbegriff setzt die Fähigkeit voraus, Bewertungen vornehmen zu können. Da schon die Frage, wofür wir als Wissenschaftler verantwortlich sind, umstritten ist, wird eine Unterscheidung nötig. Ist der einzelne Technikwissenschaftler, seine Arbeitsgruppe oder seine Institution für die Absicht, was, wie und wofür geforscht, angewendet und gestaltet wird, verantwortlich? Ist er für

die Handlung der Forschung und Entwicklung verantwortlich? Und ist er für die Anwendung dessen, was er erforscht und gestaltet hat, verantwortlich oder auch für die Folgen und Nebenfolgen dieser Forschung bzw. deren Anwendung? Ist Vermeidung von Missbrauch und Versagen schon Bestandteil des Gestaltens? Man mag diese Fragen kontrovers diskutieren, gleichwohl gilt, dass Verantwortung immer nur soweit reichen kann, wie die Handlungsmöglichkeiten reichen: Verantwortung bezieht sich auf Handlungen und Unterlassungen.

Unabhängig davon, welche Möglichkeiten aus diesem Katalog nun einer moralischen Bewertung unterzogen werden, muss man Maßstäbe für diese Bewertung haben. In der Ethik als philosophische Disziplin gibt es eine Strömung, wonach ethische Grundsätze oder Prinzipien allein (wie zum Beispiel der Kant'sche kategorische Imperativ oder die Goldene Regel) nicht ausreichen, um Beurteilungen über konkrete Handlungen oder Entscheidungen vorzunehmen. Denn diese Prinzipien geben nur Verfahren für eine Prüfung an, ob gewisse Maßstäbe verallgemeinerbar sind. So werden zur Ermittlung der Maßstäbe Werte gebraucht, mithilfe derer man aus dem Prinzip normative Sätze wie rechtliche Vorschriften, Ge- und Verbote oder auch moralische Bewertungen bilden kann.

Jede Kultur- und Kommunikationsgemeinschaft entwickelt auf der Basis von Bedürfnissen und Weltanschauungen ihre Wertsysteme anders. Von daher verbieten sich Verallgemeinerungen auch bei Wertevorstellungen, die aus Theorien über Evolution, Geist, Gesellschaft, Geschichte und Politik „abgeleitet“ worden sind.

Die früher übliche Aufteilung der Wissenschaft in die Idealtypen der Grundlagenforschung (reine Wissenschaft), der angewandten Wissenschaft und der Technik als Anwendungsbereich erzeugte eine falsche Trennung „der Zuständigkeiten“: Die Grundlagenforscher schoben die Verantwortung auf die Anwender ab, diese wiederum

auf die Entscheider. Heute stellt sich die Problematik anders dar: Ob Wissenschaft in ihrer Gesamtheit selbst Subjekt der Verantwortung sein kann, ist umstritten. Wohl aber kann man den einzelnen Wissenschaftlern und wissenschaftlichen Einrichtungen, an, mit und in denen sie arbeiten, Verantwortung zuschreiben (vgl. Kap. 6.2).

In der zeitgenössischen ethischen Debatte wird zwischen der Rollen- und der moralischen Verantwortung unterschieden. Die Rollenverantwortung eines Funktionsträgers oder Ausübenden einer qualifizierten Tätigkeit aufgrund eines selbst oder von Dritten gegebenen Auftrags (Ingenieur, Gutachter, Arzt, Rechtsanwalt, Vorstand) bezieht sich auf den Auftrag; die Instanz ist meist der Auftraggeber oder die diesen Auftrag ermöglichende Institution. Die moralische Verantwortung hingegen sieht den Menschen als verantwortlich Handelnden unabhängig von einem Auftrag und bezieht sich auf alle Handlungen und deren Bewertung mit möglichst verallgemeinerungsfähigen moralischen Maßstäben. Zwischen diesen beiden Verantwortungsweisen können Konflikte bestehen: Die Loyalität gegenüber einer Firma kann in Konflikt mit ökologischen Überzeugungen stehen, die Einsicht in die wirtschaftliche Notwendigkeit kann mit politischen oder sicherheitsorientierten Überlegungen konfliktieren. Werden verschiedene Werte zur Beurteilung ein und derselben Handlung herangezogen, können sich Konflikte ergeben. Diese Einsicht ist entscheidend, um einerseits moralischen Rigorismus zu vermeiden, andererseits aber auch solche Konflikte nachvollziehen und verstehen zu können.

Technikwissenschaftler erarbeiten im gegebenen Rahmen abgesicherte Aussagen über ihr Erkenntnisobjekt. Dies tun sie nicht im abstrakten Raum, sondern meist infolge eines Auftrages oder einer Verpflichtung, auch dann, wenn ein solcher Auftrag mit ihren Interessen nicht übereinstimmt. Der Auftraggeber oder die verpflichtende Institution, die die finanziellen und materiellen Ressourcen für die Wissensarbeit bereitstellt, darf ein systematisches Vorgehen und die effiziente Nutzung der zum Zwecke der Wissensarbeit

eingesetzten Ressourcen verlangen. Möglicherweise fördert aber gerade ein unsystematisches Vorgehen die Erkenntnis, wenn auch nicht deren Sicherung.

Aus all diesem folgt, dass die Verantwortung eines Wissenschaftlers als Wissenschaftler, und damit auch als Technikwissenschaftler, ihn nicht von der moralischen Verantwortung als Person entbindet. Damit muss er selbst seine Werte, Prinzipien und Normen finden. Die Aufgabe der Orientierung kann ihm niemand abnehmen. Für seine Rollenverantwortung als Technikwissenschaftler und Ingenieur sind die Maßstäbe jedoch weitaus konkreter, bis hin zu Haftungsfragen. Daher ist es auch in den Technikwissenschaften notwendig, Orientierungshilfen zu geben. Man könnte sogar so weit gehen zu fordern, dass wegen der Notwendigkeit der prospektiven Technikbewertung Werte selbst Bestandteil technikwissenschaftlicher Theorie und Analyse sein müssen, da technisches Wissen ohnehin nicht wertfrei ist.

Gerade dort, wo die Möglichkeiten zur Variation von Gestaltung noch sehr zahlreich sind, beim Übergang von den Modellen zu den Entwürfen und Konstruktionen, zeigen sich einige spezifische moralische Probleme, die sich bei anderen Wissenschaften weniger deutlich stellen. Die Haftungsfrage verschärft sich umso mehr, je gefährlicher Artefakte bei nicht bestimmungsgemäßem Gebrauch sein können. Man denke nur an den Begriff der Risikotechnologien. Ergebnisse aus dem Bereich der Geisteswissenschaften sind seltener mit unmittelbaren Gefährdungsmöglichkeiten verbunden, wenn man von der Genese von Ideologien und Weltbildern einmal absieht. Nicht jeder mögliche nicht bestimmungsmäßige Gebrauch oder Missbrauch lässt sich vorhersehen; die Folgenverantwortung hingegen kann sich unter Umständen schon auf den Entwurf erstrecken. Dabei fallen personell die Verantwortung für die Auftragsanforderungen und die Verantwortung für die Ausführung nicht immer zusammen. Hier besteht eine besondere Verantwortung zu umfassender Information, die in Loyalitätskonflikte mit dem Auftraggeber münden kann. Auch kann die Auftragsforschung einen

Technikwissenschaftler durchaus in eine Zwickmühle bringen, wenn er zwischen den Zwecken der Auftragsforschung und seinen eigenen Überzeugungen abwägen muss. Ein weiteres Problem ergibt sich daraus, dass gerade technikwissenschaftliche Entscheidungen im Zeitalter des weltweiten *simultaneous engineering* nicht mehr von einzelnen Personen, sondern von Teams oder Gremien gefällt werden. Der klassische Verantwortungsbegriff ist aber auf Einzelpersonen, nicht auf Kollektive für solche Entscheidungen anwendbar.

Eine Beschränkung der Ressourcen führt zwangsläufig zur Frage, welche Mittel für welche Wissensarbeit und Gestaltung bereitgestellt werden. Finanziert ein Unternehmen von Anfang an die Wissensarbeit, hat es kein Interesse daran, unbeteiligte Dritte an diesem Wissen partizipieren zu lassen. Finanziert die Gesellschaft die Arbeit, beispielsweise repräsentiert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), dann hat der Wissensarbeiter das Ergebnis der Gesellschaft zu übergeben und offenzulegen. Konflikte können entstehen, wenn im Rahmen der Förderung der Industrieforschung Mischformen entstehen. Diese Konflikte können auch rechtlich relevant werden.

Eine Beschränkung der Ressourcen bringt auch eine Beschränkung des Sicherheitsaufwandes mit sich, den man bei der Gestaltung noch betreiben kann. Ist derjenige, der zum Beispiel aus wirtschaftlichen Gründen relevante Budgets, etwa für die präventive Instandhaltung oder Ähnliches, kürzt, für dann eintretende Schäden auch verantwortlich? Auch wenn man diese Frage bejaht, sind die rechtlichen Konsequenzen einer solchen Verantwortung weitgehend ungeklärt.

6.2 VERANTWORTUNG IN DER TECHNIK

Zur Ingenieursverantwortung gibt es eine Reihe von Überlegungen, die zur Ausformulierung von Leitlinien und Codizes geführt haben. Ihnen ist gemeinsam, dass sie auf die besondere Gestaltungsmächtigkeit der Entscheidungen

und des Handelns von Ingenieuren abzielen, diese aber jeweils mit berufsspezifischen Momenten ständischen Selbstverständnisses verknüpfen. Dies ist zwar legitim, macht es aber schwierig, auf der vergleichsweise unspezifischen Ebene der Technikwissenschaften zu verallgemeinerbaren Aussagen zu kommen. So ist es nicht verwunderlich, dass mittlerweile für fast jede Fachrichtung und Branche eigene Codizes entwickelt und veröffentlicht wurden.

In den ethischen Grundsätzen des Ingenieurberufs des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) werden beispielsweise die Instanz und der Gegenstand der Verantwortung sehr weit gefasst. Dort heißt es unter anderem, dass die Ingenieure nicht nur für die sorgfältige Wahrnehmung ihrer spezifischen Pflichten, die ihnen aufgrund ihrer Kompetenz und ihres Sachverstandes zukommen, verantwortlich seien, sondern auch für die Folgen ihrer beruflichen Arbeit. In arbeitsteiligen Zusammenhängen gelte eine entsprechende Mitverantwortung. So haben sie auch ihre Handlungen gegenüber ihrem Berufsstand, den gesellschaftlichen Institutionen, den Arbeitgebern, Auftraggebern und Techniknutzern zu verantworten. Es wird in diesen Leitlinien von einer Bringpflicht für sinnvolle technische Erfindungen und Lösungen gesprochen. Die technische Verantwortung werde wahrgenommen, indem für Qualität, Zuverlässigkeit und Sicherheit sowie fachgerechte Dokumentation der technischen Produkte und Verfahren Sorge getragen wird. Der Kodex verweist darauf, dass Technikgestaltung selbstverantwortliches Handeln in der Gegenwart und Zukunft ermöglichen muss. Das schließt Konflikte sicher nicht aus, kann sie aber durch Offenlegung entschärfen.

Ein Problem besteht auch darin, dass die meisten Werte, die in fast allen Kulturen eine Rolle spielen, in gewissen Konfliktbeziehungen zueinander stehen. Werte geben an, was angestrebt werden soll und welches dahinter liegende Gut als wertvoll oder als zu verehren erachtet wird. Im Bereich der Technikbewertung hat der VDI mit dem von ihm vorgeschlagenen Wertekatalog einen mutigen Versuch

unternommen, an dieser Stelle mit einer, wenn auch notgedrungen unvollständigen, materialen Werteethik zu beginnen. Wertebenen, die man bei einer Technikbeurteilung für die Produkte wie für die Folgen und Nebenfolgen des Gebrauchs anwenden kann, sind: Funktionsfähigkeit, Wirtschaftlichkeit, Wohlstand, Sicherheit, Gesundheit, Umweltqualität, Persönlichkeitsentfaltung und Gesellschaftsqualität. Man erkennt sofort die ihnen unterliegenden Konflikte untereinander sowie Konflikte in den Ziel-Mittel-Relationen. Viele dieser Konflikte können durch keine Priorisierungsregel gelöst werden, sondern müssen diskursiv in konkreten Situationen mit den Beteiligten aufgearbeitet werden. Priorisierungsregeln legen im Konfliktfall den Vorrang des einen Wertes vor einem anderen fest. Die Frage ist, ob Priorisierungsregeln wie zum Beispiel Sicherheit vor Wirtschaftlichkeit oder Persönlichkeitsentfaltung versus Gesellschaftsqualität unveränderlich in jeder Beurteilungssituation gelten müssen oder ob sie sich nicht im Laufe der Zeit und mit zunehmendem Wissensstand in den Technikwissenschaften selbst verändern. Damit wird ein organisierter gesellschaftlicher Diskurs über das, was wir mit Technik erreichen wollen und welche Technik wir wollen, auch auf der Ebene der Technikwissenschaften unumgänglich.

Bei diesem Diskurs spielt die Abwägung zwischen Werten eine wichtige Rolle. Als Beispiel diene die Abwägung zwischen Nutzen und Schaden. Ein wichtiger Faktor dabei ist die Sicherheit. Dieser Begriff reicht von der Standicherheit von Bauwerken über die Funktionssicherheit von Geräten bis zur sicheren Prognose des Verhältnisses der eingesetzten Mittel zum erzielbaren Nutzen und möglichen Schaden eines Projektes. Selbst die Vermeidung von Fehlbedienung und Missbrauch wird einbezogen. Sicherheit und Gebrauchsfähigkeit sind in besonderem Maße von zufälligen Ereignissen abhängig und daher keine deterministische Größe. Ihr „Mittelwert“ (als heuristischer Begriff) wird durch den Umfang der von der Gesellschaft für den Zweck eingesetzten Mittel, durch die Qualität der Ingenieurleistung, durch die praktische Handhabung der

jeweiligen Technik (etwa Fehlbedienung oder Missbrauch) sowie durch äußere Ereignisse (etwa Erdbeben) bestimmt. Die ethische und rechtliche Verantwortung für das mit einer Ingenieuraktivität immer verbundene Restrisiko muss daher fair zwischen den Ingenieuren und der Gesellschaft verteilt sein. Denn es gibt nicht nur ein Restrisiko für den Nutzer oder Betroffenen einer Technik, sondern auch für den Ingenieur im Sinne seiner Verantwortung und Haftung für Folgeschäden einer von ihm geplanten, gebauten, installierten, betriebenen oder entsorgten Technik.

Haftung stellt in gewisser Weise die konkrete Materialisierung von Verantwortung dar. Der Ingenieur als Individuum ist gegenüber dem Auftraggeber einerseits, aber auch der Gesellschaft andererseits im Rahmen gesetzlicher Bestimmungen verantwortlich und damit auch haftbar. Allerdings verändert sich die konkrete Haftung, je weiter das Verantwortungssubjekt von der konkreten Gestaltung entfernt agiert: Bei der Verantwortungsübernahme zum Beispiel für ein unehrenhaftes wissenschaftliches Verhalten kann man nicht mehr von Haftung sprechen, sondern nur noch von Sanktionen, beispielsweise dem Ausschluss aus der wissenschaftlichen Gemeinschaft.

Sofern der Technikwissenschaftler im gestaltenden Bereich seiner Wissenschaft als Ingenieur arbeitet, kann er diese ethischen Grundsätze als erste Orientierung benutzen. Sie heben darauf ab, dass die persönliche universal-moralische Verantwortung (das, worauf er sich als Person verpflichtet fühlt) der Rollenverantwortung (als Ingenieur, Entwickler, Manager) vorausgehen soll. Im Rahmen technischer Verantwortung soll er Qualität, Zuverlässigkeit und Sicherheit der technischen Produkte gewährleisten. Er wird dort auch als mitverantwortlich für die wohlinformierte Nutzung technischer Produkte angesehen, sodass sie wie vorgesehen verwendet werden und ein naheliegender Fehlgebrauch vermieden wird. Insbesondere heben die Leitlinien eine strategische Verantwortung für die Berücksichtigung von Fehlentwicklungen und Möglichkeiten vorsätzlichen

Fehlgebrauchs hervor und empfehlen dem Ingenieur, sich bei der Gestaltung von Technik am Erhalt der Bedingungen verantwortlichen Handelns zu orientieren, das heißt, dass er einen eigenverantwortlichen Umgang der Nutzer mit Technik ermöglichen muss.

Hier sind Technikwissenschaftler, gerade dann, wenn sie in den Bereichen der Anwendung und der Gestaltung arbeiten, auf eine ethische und rechtliche Beratung angewiesen, die von den Standesorganisationen bereitgestellt werden

muss. Auf jeden Fall besteht jedoch gerade aufgrund der großen fachlichen Kompetenz die Verpflichtung, am gesellschaftlichen Diskurs über Verantwortung in der Technik teilzunehmen und nicht nur dessen einvernehmlichen Resultaten Rechnung zu tragen, sondern auch dessen Bedenken, vorläufigen Ergebnissen und Empfindlichkeiten bei der technikwissenschaftlichen Arbeit. Das heißt auch, im Zweifelsfalle selbst darauf hinzuweisen, dass ein ethischer Klärungsbedarf besteht bzw. mit künftig möglicher Technik entstehen könnte.

WEITERFÜHRENDE LITERATUR

(Mit * gekennzeichnete Einträge stellen kapitelübergreifende Literaturhinweise dar.)

1 EINLEITUNG

Mitcham, C. (ed.): *Encyclopedia of Science, Technology, and Ethics*, Detroit: Gale Cengage 2005.

Kuhn, Th.: *The Structure of Scientific Revolutions*, Chicago: Univ. Chicago Press 1970; dt.: *Struktur wissenschaftlicher Revolutionen*, Frankfurt a. M.: Suhrkamp 2001.

2 VOM INGENIEURWESEN ZU DEN TECHNIKWISSENSCHAFTEN

Buchheim, G./Sonnemann, R. (Hrsg.): *Geschichte der Technikwissenschaften*, Leipzig: Edition Leipzig 1990.

Lakatos, I.: „Die Geschichte der Wissenschaft und ihre rationale Konstruktion“. In: Diedrich, W. (Hrsg.): *Theorien der Wissenschaftsgeschichte*, Frankfurt a. M.: Suhrkamp 1974, S. 55–119.

König, W.: *Technikwissenschaften. Die Entstehung der Elektrotechnik aus Industrie und Wissenschaft zwischen 1880 und 1914*, Chur: G+B Verlag Fakultas 1995.

Poser, H.: *Wissenschaftstheorie. Eine philosophische Einführung*, Stuttgart: Reclam, 2001.

Mitcham, C.: *Thinking through Technology: The Path between Engineering and Philosophy*, Chicago: University of Chicago Press 1994.

Spur, G.: *Technologie und Management - Zum Selbstverständnis der Technikwissenschaften*. München: Hanser 1998.

Stegmüller, W.: *Probleme und Resultate der Wissenschaftstheorie und Analytischen Philosophie; Band I: Erklärung-Begründung-Kausalität*, Heidelberg: Springer 1983; *Band II: Theorie und Erfahrung*, Heidelberg: Springer 1974.

3 DIE TECHNIKWISSENSCHAFTEN UND IHR ORT IN DEN WISSENSCHAFTEN

Banse, G./Grunwald, A./König, W./Ropohl, G. (Hrsg.): *Erkennen und Gestalten. Eine Theorie der Technikwissenschaften*, Berlin: Edition sigma 2006.

4 ERKENNEN IN DEN TECHNIKWISSENSCHAFTEN

Banse, G./Ropohl, U. (Hrsg.): *Wissenskonzepte für die Ingenieurpraxis. Technikwissenschaften zwischen Erkennen und Gestalten*, Düsseldorf: VDI-Verlag 2004.

Bensaude-Vincent, B./Loeve, S./Nordmann, A./Schwarz, A.: „Matters of Interest: The Objects of Research in Science and Technoscience“. In: *Journal for General Philosophy of Science* 42 (2011), S. 365–383.

Banse, G./Wendt, H. (Hrsg.): *Erkenntnismethoden in den Technikwissenschaften. Eine methodologische Analyse und philosophische Diskussion der Erkenntnisprozesse in den Technikwissenschaften*, Berlin: Edition Sigma 1986.

Davenport, Th. H./Prusak, L.: *Working Knowledge: How Organizations Manage What They Know*. In: http://www.acm.org/ubiquity/book/t_davenport_1.html. Reprinted by permission of Harvard Business School Press. Excerpt of *Working Knowledge: How Organizations Manage What They Know* by Thomas H. Davenport and Lawrence Prusak. Cambridge, MA 2000.

Bunge, M.: *Scientific Research II – The Search for Truth*, Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1967.*

Floyd, C./Züllighoven, H./Budde, R./Keil-Slawik R. (Hrsg.): *Software Development and Reality Construction*, Berlin: Springer 1992.

Klir, G. J.: *An Approach to General System Theory*, New York: Van Nostrand 1969.

Kornwachs, K.: *Strukturen technischen Wissens – Analytische Studien zu einer Wissenschaftstheorie der Technik*, Berlin: Edition Sigma 2012.

Lenk, H.: „Wissenschaftstheorie und Systemtheorie. Zehn Thesen zu Paradigma und Wissenschaftsprogramm des Systemansatzes“. In: Lenk, H./Ropohl, G. (Hrsg.): *Systemtheorie als Wissenschaftsprogramm*, Königstein/Ts.: Athenäum 1978.

Luhmann, N.: *Soziale Systeme. Grundriß einer allgemeinen Theorie*, Frankfurt a. M.: Suhrkamp 1984.

Mainzer, K.: *Komplexität*, Paderborn: Profile 2008.

Polyani, M.: *The Tacit Dimension*, London, Routledge und Chicago: University of Chicago Press 1966.

Stachowiak, H.: *Allgemeine Modelltheorie*, Wien, New York: Springer 1973.*

Vries, M. J. de: „The Nature of Technological Knowledge: Extending Empirically Informed Studies into What Engineers Know“. In: *Téchné. Journal of the Society for Philosophy and Technology* 2003, Nr. 3. URL: <http://scholar.lib.vt.edu/ejournals> [Stand Januar 2012].

Zeigler, B. P./Praehofer, H./Kim, T. G.: *Theory of Modelling and Simulation*, Amsterdam u. a.: Academic Press 2000.*

5 GESTALTEN IN DEN TECHNIKWISSENSCHAFTEN

acatech (Hrsg.): *Technikzukünfte. Vorausdenken – Erstellen – Bewerten* (acatech IMPULS), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2012.

Blessing, L. T. M./Chakrabarti, Amaresh: *Design Research Methodology*, London: Springer 2009.

Kolmogorov, A. N.: „Three Approaches to the Quantitative Definition of Information“. In: *Problems Inform. Transmission* 1 (1965/1), S. 1 – 7. Deutsche veränderte Fassung in: Kolmogoroff, A.: *Theorie der Nachrichtenübermittlung. Mathematische Forschungsberichte* 4, 1967, S. 91 – 116.

Kornwachs, K. (Hrsg.): *Technologisches Wissen – Entstehung, Methoden, Strukturen* (acatech diskutiert), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2010.

Mesarovic, M. D.: „A Mathematical Theory of General Systems“. In: Klir, G. (ed.): *Trends in General System Theory*, New York, London, Sydney, Toronto: Wiley-Interscience 1972, S. 251 – 269.

Müller, J.: *Arbeitsmethoden der Technikwissenschaften. Systematik – Heuristik – Kreativität*, Berlin u. a.: Springer 1990.

Pichler, F.: *Mathematische Systemtheorie, Dynamische Konstruktionen*, Berlin, New York: Walter de Gruyter 1975.

Ropohl, G.: *Allgemeine Technologie : Eine Systemtheorie der Technik* (3. überarbeitete Aufl. von: Eine Systemtheorie der Technik: zur Grundlegung der Allgemeinen Technologie), München/Wien: Hanser 1979, Karlsruhe: Universitätsverlag 2009. URL: <http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000011529> [Stand: Februar 2012].

6 VERANTWORTUNG

acatech (Hrsg.): *Akzeptanz von Technik und Infrastrukturen. Anmerkungen zu einem gesellschaftlichen aktuellen Problem* (acatech bezieht Position, Nr. 9), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2011.

Flores, A. (Hrsg.): *Ethical problems in Engineering*, New York: Reading 1980.

Grunwald, A. (Hrsg.): *Handbuch Technikethik*, Stuttgart, Weimar: Metzler 2013 (in Vorbereitung).

Hubig, Ch./Reidel, J. (Hrsg.): *Ethische Ingenieursverantwortung – Handlungsspielräume und Perspektiven der Kodifizierung*, Berlin: Edition Sigma 2003.

Hubig, Ch.: *Technik- und Wissenschaftsethik. Ein Leitfaden* (2. Aufl.), Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1995.

Kornwachs, K.: *Das Prinzip der Bedingungserhaltung*. Münster, London: Lit 2000.

Lenk, H./Maring, M. (Hrsg.): *Technik und Wirtschaftsethik*, Opladen: Leske+Budrich 1998.

Lenk, H./Ropohl, G. (Hrsg.): *Technik und Ethik* (2. rev. Auflage), Stuttgart: Reclam jun. 1993.

Rapp, F. (Hrsg.): *Aktualität der Technikbewertung – Erträge und Perspektiven der VDI – Richtlinie 3780 zur Technikbewertung* (VDI-Report Nr. 29), Düsseldorf: VDI-Verlag 1999.

Ropohl, G.: *Ethik und Technikbewertung*, Frankfurt: Suhrkamp 1996.

VDI Verein Deutscher Ingenieure: *Ethische Ingenieursverantwortung. Handlungsspielräume und Perspektiven der Kodifizierung* (VDI Report 31), Düsseldorf: VDI-Verlag 2000.

VDI Verein Deutscher Ingenieure: *VDI Richtlinie 3780 Technikbewertung. Begriffe und Grundlagen*, Düsseldorf: VDI-Verlag 1991.

> BISHER IST IN DER REIHE acatech IMPULS FOLGENDER BAND ERSCHIENEN:

acatech (Hrsg.): *Technikzukünfte. Vorausdenken – Erstellen – Bewerten* (acatech IMPULS), Heidelberg u. a.: Springer Verlag 2012.

> acatech – DEUTSCHE AKADEMIE DER TECHNIKWISSENSCHAFTEN

acatech vertritt die deutschen Technikwissenschaften im In- und Ausland in selbstbestimmter, unabhängiger und gemeinwohlorientierter Weise. Als Arbeitsakademie berät acatech Politik und Gesellschaft in technikwissenschaftlichen und technologiepolitischen Zukunftsfragen. Darüber hinaus hat es sich acatech zum Ziel gesetzt, den Wissenstransfer zwischen Wissenschaft und Wirtschaft zu unterstützen und den technikwissenschaftlichen Nachwuchs zu fördern. Zu den Mitgliedern der Akademie zählen herausragende Wissenschaftler aus Hochschulen, Forschungseinrichtungen und Unternehmen. acatech finanziert sich durch eine institutionelle Förderung von Bund und Ländern sowie durch Spenden und projektbezogene Drittmittel. Um den Diskurs über technischen Fortschritt in Deutschland zu fördern und das Potenzial zukunftsweisender Technologien für Wirtschaft und Gesellschaft darzustellen, veranstaltet acatech Symposien, Foren, Podiumsdiskussionen und Workshops. Mit Studien, Empfehlungen und Stellungnahmen wendet sich acatech an die Öffentlichkeit. acatech besteht aus drei Organen: Die Mitglieder der Akademie sind in der Mitgliederversammlung organisiert; das Präsidium, das von den Mitgliedern und Senatoren der Akademie bestimmt wird, lenkt die Arbeit; ein Senat mit namhaften Persönlichkeiten vor allem aus der Industrie, aus der Wissenschaft und aus der Politik berät acatech in Fragen der strategischen Ausrichtung und sorgt für den Austausch mit der Wirtschaft und anderen Wissenschaftsorganisationen in Deutschland. Die Geschäftsstelle von acatech befindet sich in München; zudem ist acatech mit einem Hauptstadtbüro in Berlin und einem Büro in Brüssel vertreten.

Weitere Informationen unter www.acatech.de