

Egon Althaus

Was ist Reversibilität?

Der Begriff „Reversibilität“ hat im Zusammenhang mit Maßnahmen an historischen Bauwerken und anderen Kunstwerken eine frappierende Beliebtheit erlangt, wird aber freilich von seinen Benutzern mit durchaus verschiedenartigem, schillerndem Sinngehalt gebraucht und zu äußerst verschiedenen Anlässen ins Feld geführt. Einerseits gibt es eine höchst angenehme Klangähnlichkeit mit „Sensibilität“, welche auf Erhaltungs-, Reparatur- oder Restaurations-Arbeiten ausstrahlt und diese als besonders wohltuend für ein historisches Bau- denkmal etikettiert. Zum anderen signalisiert die „Reversibilität“ eine gewisse Unverbindlichkeit, dann nämlich, wenn die Möglichkeit impliziert wird, eine Maßnahme, die sich nicht bewährt hat, wieder rückgängig machen zu können, ohne daß ein Schaden am Objekt zurückbleibt. Dies wäre eine Rückversicherung gegen Unzulänglichkeiten in Planung und Ausführung, welche man allerdings durch sorgfältige Analyse und kritisches Vorausdenken hätte vermeiden können – wahrhaftig ein Feigenblatt in der Denkmalpflege! Beispiele sind zahllos zu finden, mit denen solche Gedanken illustriert werden könnten; den Begriff der Reversibilität erhellen sie allerdings höchst unvollkommen und gewiß nicht eindeutig.

Die Auffassung der Denkmalpfleger

Reversibilität bei einem Eingriff in ein geschädigtes Bauwerk mit der Absicht, etwas für dessen Erhalt zu tun, bedingt einen Zyklus in einem offenen System¹ durch eine Folge von Maßnahmen. Zu Beginn eines Zyklus befindet sich das geschädigte Bauwerk in einem bestimmten Zustand. Dieser wird geändert durch einen Eingriff, etwa eine Reparatur oder Ergänzung, welcher den Zustand des Denkmals dem – häufig nur vermuteten – Urzustand näherbringen oder zumindest den augenblicklichen Zustand festhalten soll. Dies ist nur möglich unter Hinzufügung (oder auch Wegnahme) von Substanz und macht stets die Aufwendung von Energie notwendig. Häufig kann dieser Eingriff rückgängig gemacht werden; dies bedeutet jedoch eine neue Maßnahme: Entfernung (oder Hinzufügung) der im ersten Schritt eingebrachten Sub-

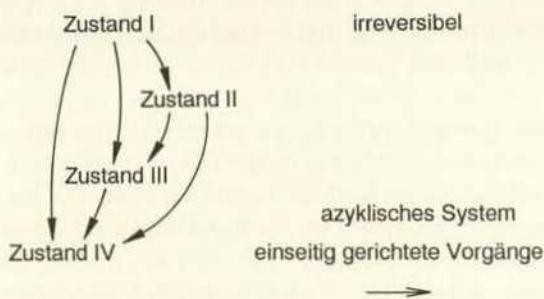
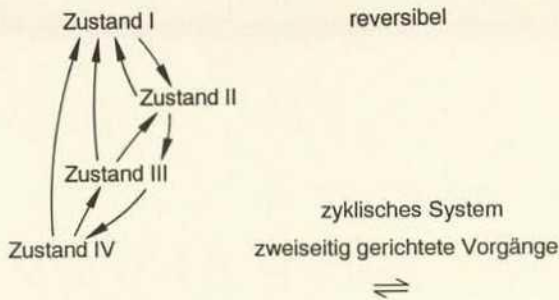
stanz unter erneutem erheblichen Aufwand an Energie. Dabei wird allerdings das Denkmal durchaus nicht in den ursprünglichen Zustand zurückversetzt, sondern allenfalls in einen, der diesem ähnlich ist. Selbstverständlich kann man nicht nur die Ausgangsform wiederherstellen, sondern auch einen wesentlichen Teil des Ausgangsmaterials, oder zumindest Material einbringen, das dem Ausgangsmaterial ähnlich ist. Abriß und Wiederaufbau des Westchors des Wormser Doms sind ein Beispiel für einen solchen Zyklus. Nach dem Abschluß der Arbeiten entsprach das Erscheinungsbild dem davor; die Maßnahmen waren selbstverständlich nicht reversibel, weder für sich allein genommen noch in ihrer Summe.

Eine Anastylose, ganz oder teilweise, ist zweifellos auch ein Eingriff, in welchem ein ehemaliger Zustand wiederhergestellt werden soll. Teilweise wird man das originale Material weiterverwenden, teilweise aber auch zu Ersatzmaterial greifen. Es ist auch bei großzügiger Auslegung des Begriffs nicht möglich, hier von einer „Reversion“ zu sprechen, nicht einmal dann, wenn eine umgefallene Wand oder Säule nur wieder aufgerichtet wurde. Die Reversibilität im Bereich der Denkmalpflege ist offensichtlich nicht leicht zu fassen.

Die Definition der Naturwissenschaftler

Leichter hat es der Naturwissenschaftler mit dem Begriff „reversibel“. Für ihn ist die Reversibilität eindeutig definiert als die Möglichkeit, einen gerichteten Vorgang, einen Ablauf, durch Änderungen der äußeren Parameter **umzukehren**, in die entgegengesetzte Richtung zu lenken. Ein solcher Zyklus kann zum Beispiel beschrieben werden durch eine chemische Reaktion, wie etwa die Bildung von Rost aus Eisen und dessen Rückverwandlung in das Metall. Im ersten Fall handelt es sich um eine Oxidation, im zweiten um eine Reduktion. Der Gesamtprozeß kann so gelenkt werden, daß beliebig oft zwischen den beiden Zuständen „Metall“ und „Rost“ hin- und hergewandert werden kann; dies wäre also eine perfekte Reversibilität – allerdings nur für den Stoff. Ein reversibler Vorgang ist stets zyklisch angelegt.

Reversible und irreversible Vorgänge



1 Zustandsänderungen durch reversible und irreversible Vorgänge

Der Kontrast zu reversiblen Prozessen sind irreversible Vorgänge. Bei den letzteren ist nur eine Richtung möglich – sie können nicht umgekehrt werden (Abb. 1). Irreversible Vorgänge definieren stets ein azyklisches System.

Alle natürlichen Prozesse laufen unter Austausch von Energie ab. Eine Energieumformung bestimmt auch, ob ein Vorgang reversibel oder irreversibel ist. Gleichgewicht zwischen zwei Zuständen bedeutet Stillstand; ein Energieumsatz findet dann nicht statt. Selbstverständlich gibt es in der Natur solche Gleichgewichtszustände, zum Beispiel Gesteine, die ihre Reaktionsfähigkeit verloren haben, weil die möglichen Reaktionen vollständig abgelaufen sind (Abb. 2). Eine ablaufende Reaktion definiert aber stets ein Ungleichgewicht.

Die maßgebliche Energieform bei chemischen Prozessen ist die sogenannte „Gibbs'sche Freie Energie“ ΔG^2 oder „Freie Enthalpie“. Dies ist eine abgeleitete Größe, zusammengesetzt aus der „Wärmetönung“ oder Enthalpie ΔH , das ist die Energie, die bei einer Reaktion insgesamt umgesetzt wird, und der „gebundenen Energie“ $T \cdot \Delta S$. Es gilt

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

Ein Teil von ΔH , nämlich der Betrag $T \cdot \Delta S$, wird auf jeden Fall in Wärme umgewandelt (daher „gebundene“ Ener-



2 Dünnschliffbild eines Gesteins im Reaktionsgleichgewicht (Die Körner ungefähr gleich groß, Winkel zwischen drei Körnern ca 120°)

gie, weil er an die Wärme „gebunden“ ist). Über die Differenz kann frei verfügt werden (daher „freie“ Energie); sie kann zusätzlich ebenfalls in Wärme, aber stattdessen auch in eine andere Energieform, z.B. mechanische Energie, umgewandelt werden. Die Größe ΔG ist bestimmend dafür, ob und in welcher Richtung eine Reaktion abläuft. Ist sie null, so herrscht Gleichgewicht und keine Reaktion findet statt. Ist sie negativ, so läuft eine Reaktion spontan in der einen Richtung, ist sie positiv, so läuft sie in der entgegengesetzten Richtung ab. Für diese Steuerung genügen winzige, „differentielle“ Abweichungen der Freien Enthalpie von null. Nur unter solchen Bedingungen ist die Reversion einer Reaktion möglich, woraus folgt, daß **Reversibilität** nur in der Nähe des Gleichgewichts gegeben ist.

Maßgeblich für den Betrag und das Vorzeichen von ΔG ist die Größe ΔS . Diese bestimmt somit auch die Richtung, in der eine Reaktion abläuft; hiervon hat sie ihren Namen „Entropie“.

Umkehrbarkeit und Entropie

Diese Größe Entropie hat bemerkenswerte Eigenschaften. Im Gleichgewicht ist die Entropieänderung einer Reaktion null, in spontan ablaufenden Reaktionen nimmt die Entropie stets zu. Eine Abnahme von Entropie in einer spontan ablaufenden Reaktion kommt nicht vor; soll eine Abnahme erzielt werden, muß Energie ins System investiert werden. Dies Verhalten, zusammengefaßt als Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik oder Entropiesatz, enthält einen wichtigen Aspekt der Reversibilität: Wenn eine Reaktion abläuft, also ihre Entropie zunimmt, kann sie nur umgekehrt, also die Entropie erniedrigt werden, wenn hierzu Energie aufgewandt wird – es sei denn, die Entfernung vom Gleichgewicht war so gering (differentiell), daß die Entropieänderung unmerklich war. Spontan ablaufende Reaktionen können also nur mit Aufwand umgekehrt werden, weil Entropie spontan nur zunehmen, aber nicht abnehmen kann.



3 Ausbruch des Vesuv (Italien) im Jahr 1944:
Transport von Energie und Materie als natürlicher
Vorgang

Durch Einflußnahme von außen, also durch Energieeinspeisung, kann eine jede Reaktion umgekehrt werden, ohne daß die Bedingungen für strikte „Reversibilität“, also Nähe zum Gleichgewicht, eingehalten werden. Die Entropieänderung einer Reaktion besteht aus zwei Anteilen: einem irreversiblen, der dem Entropiesatz gehorcht und somit stets positiv ist, und einem reversiblen, der je nach Energieeinsatz positiv oder negativ (oder null) ist.

$$\Delta S_g = \Delta S_r + \Delta S_i$$

(g = gesamt, r = reversibel, i = irreversibel)

Im Gleichgewicht ist die reversible Entropie gleich der negativen irreversiblen, die Gesamtänderung somit null.

Aus dem bisher Gesagten ergibt sich unmittelbar der Unterschied zwischen irreversiblen und reversiblen Vorgängen: Reversible Vorgänge laufen nur im (bzw. nahe dem) Gleichgewicht ab; das bedeutet aber auch, daß sie umso langsamer ablaufen, je dichter sie am Gleichgewicht liegen – im Fall des Gleichgewichts selbst sogar „unendlich langsam“, also gar nicht.

Reversible und irreversible Prozesse

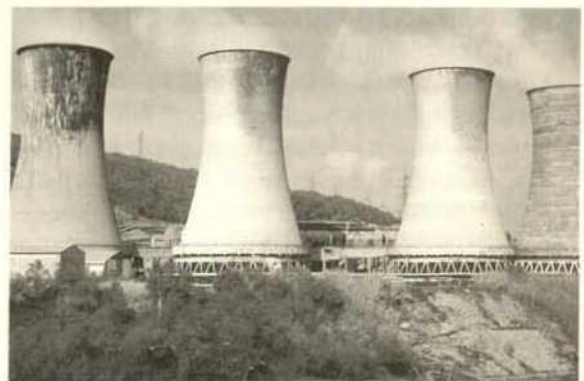
In der Natur ablaufende Prozesse dagegen stellen stets Ungleichgewichte dar; sie laufen mit endlicher, häufig sogar sehr hoher Geschwindigkeit (z.B. Explosionen) ab. Sie haben stets einen mehr oder weniger hohen irreversiblen Anteil, sind ihrer Natur nach somit nicht reversibel. Meist gehen sie mit Transportprozessen einher, sei es mit dem Transport von Energie oder Materie oder beidem (Abb. 3–5).

Spektakuläre Naturvorgänge wie Erdbeben (hauptsächlich Energietransport) oder Vulkanausbrüche (Transport von Energie **und** Materie) sind augenfällige Beispiele, aber auch das Wachsen eines Baumes und schließlich unser eigenes Leben gehören hierher. Keiner von diesen Vorgängen ist umkehrbar, alle sind sie irreversibel.

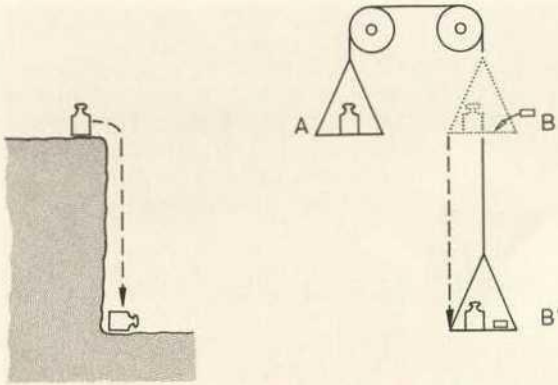


4 Kalksinterterrassen von Pamukkale (Türkei):
Hauptsächlich Transport von Materie

Natürlich ist es möglich, Vorrichtungen zu erfinden, mit deren Hilfe man eigentlich irreversible Vorgänge umkehren kann: Der Ausschlag einer Waage kann umgekehrt werden, wenn – unter Umständen sehr kleine – Gewichte von einer Waagschale in die andere verlagert werden, ein (Materie- oder elektrischer) Strom kann durch Änderung des Gefälles (der Polung) umgekehrt werden. Ein fallendes Gewicht kann wieder aufsteigen, wenn man ein entsprechendes Gerät konstruiert (Abb. 6). Aber zu solchen Reversionen bedarf es beträchtlicher, aufwendiger (d.h. Energie-aufwendiger) Eingriffe von außen.

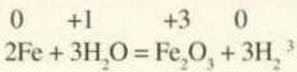


5 Gewinnung elektrischer Energie aus Erdwärme in
Larderello (Italien)



6 Bewegung eines Gewichts im Schwerfeld. Links: Irreversibler Fall. Rechts: Gleichgewicht zwischen zwei Gewichten der Masse M , reversible Bewegung durch Zufügen eines Zusatzgewichts B mit der Masse ∂M auf der einen bzw. anderen Seite.

Auch chemische Prozesse können umgekehrt werden. Beispiele liefern Elektrochemie und Lösungs-Chemie. Die elektrochemische Reaktion der Oxidation von Eisen („Rosten“) läuft formell folgendermaßen ab:

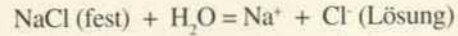


Dem Eisen werden drei Elektronen entzogen (das bedeutet: das Eisen wird „oxidiert“), die zum Wasserstoff wandern und diesen aus der positiv einwertigen in die nullwertige (d.h. neutrale) Form des „elementaren“ Wasserstoffs verwandeln (das Wasser, genauer: der Wasserstoff des Wassers, wird „reduziert“). Insgesamt wandern hierbei 6 Elektronen vom Eisen zum Wasserstoff.

Dieser Vorgang kann auf chemischem Wege umgekehrt werden, d.h. der Rost kann wieder in Metall zurückverwandelt werden. Man braucht nur dafür zu sorgen, daß die Elektronen in umgekehrter Richtung fließen, also vom Wasserstoff zum dreiwertigen Eisen. Dann wird der Wasserstoff oxidiert und der „Rost“ reduziert. Diese Umkehrung ist einfach zu bewirken, zum Beispiel durch Anlegen einer entsprechenden Spannung, also durch Schaffung eines elektrischen Potentialgefälles⁴. Dieser Vorgang ist beliebig oft umkehrbar, aber es muß jedes Mal elektrische Energie aufgewandt werden. Es ist zu beachten, daß jeweils ein Energieaufwand durch einen äußeren Eingriff betrieben werden muß. Spontan erfolgt die Umkehr natürlich nicht, es sei denn durch Änderung der äußeren Bedingungen infolge ziemlich tiefgreifender Maßnahmen.

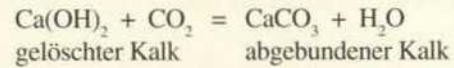
In der Lösungsschemie sind ebenfalls unschwer Beispiele zu finden, wie Vorgänge durch Änderung der äußeren Bedingungen umgekehrt, reversiert, werden können. Zwei seien hier erwähnt, die auch für die Restaurierung historischer Bauwerke von besonderer Bedeutung sind: Salzbildung und Kalk-Abbinden.

Die Salzbildung läßt sich, auch für höchst unterschiedliche Stoffe, auf einfache Reaktionen stets gleichen Typs zurückführen, die durch folgendes Beispiel illustriert werden:



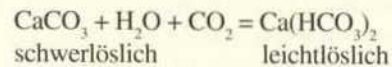
Diese Reaktion läuft von links nach rechts ab, also im Sinne der Auflösung von Salz, wenn Wasser zugeführt wird, von recht nach links dagegen, wenn Wasser entzogen wird. Zufuhr von Wasser kann durch Diffusion, Strömung usw. leicht erfolgen; die Reaktion läuft dann spontan ab. Um sie umzukehren, das Salz also auskristallisieren zu lassen, muß das Wasser verdampfen, also Energie zugeführt werden: Umkehrung der Reaktion unter Energieaufwand. Spontan läuft die Reaktion dann ab, wenn ein Konzentrationsgefälle vorhanden ist, dessen Richtung auch die Richtung des Ablaufs bestimmt (Abb. 7).

Ähnlich vollzieht sich das Abbinden von Kalk, doch sind hieran mehrere Stoffe beteiligt. Die Chemie-Grundlagen lassen sich wieder in einer höchst einfachen Gleichung beschreiben:



Die Reaktion läuft entweder von links nach rechts oder von rechts nach links ab, wenn ein Konzentrationsgefälle sowohl im Kohlendioxid- als auch im Wasser-Angebot vorhanden ist. Wird CO_2 zu- und Wasser abgeführt, läuft die Reaktion von links nach rechts, also im Sinne des Kalkabbindens ab, bei Entzug von CO_2 und Zufuhr von H_2O dagegen in umgekehrter Richtung, also im Sinne einer Rehydratisierung des Calcits. Auch hier ist offensichtlich, daß eine Umkehrung nur unter gründlicher Änderung der äußeren Bedingungen (Verfügbarkeit von CO_2 und H_2O) möglich ist.

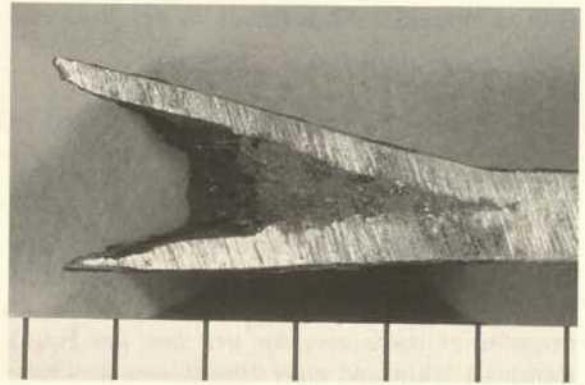
Eine weitere Reaktion muß in diesem Fall in einem wässrigen Milieu in Betracht gezogen werden, die scheinbar eine spontane Umkehrung, also eine echte Reversion, eines sonst einseitig gerichteten Prozesses bewirkt. Sie wird ebenfalls durch eine einfache Reaktionsgleichung wiedergegeben:



Hierbei wird eine in Wasser schwerlösliche Substanz in eine leichtlösliche überführt, also aufgelöst. Bei einem hohen Angebot von Kohlendioxid und gleichzeitiger Anwesenheit relativ großer Wassermengen läuft die Reaktion von links nach rechts, also zur Auflösung des Calcits, bei Verringerung des CO_2 -Gehalts im Umfeld dagegen von rechts nach links, also zur Wiederausfällung des Calcits. Dieser Reaktion verdanken Tropfsteinhöhlen ihre Existenz, aber man kann auch in Kalkmörtel-Mauerwerk Spuren dafür finden, daß sie – oft sogar in vielfacher Wiederholung – häufig abgelaufen ist.



7 „Ausblühen“ von Salz aus einer Mauer (Festung Ehrenbreitstein). Salz wurde im Inneren der Mauer gelöst, in einem Konzentrationsgradienten transportiert und an der Oberfläche durch einen steilen Gradienten im Wasserdampfdruckausgefällt: Irreversibler Vorgang



8 Spaltkorrosion an einem Träger der Eisenbahnbrücke über den Rhein bei Waldshut. Die Materie des Eisenoxids könnte zwar in Metall rückverwandelt werden, das Werkstück aber nicht die alte Form erhalten: Form-Irreversibilität

Trotzdem handelt es sich auch hier nicht um eine einfache Reversion im strengen Sinne, denn zum Ablauf in der einen oder anderen Richtung sind kräftige Abweichungen von den Gleichgewichtsbedingungen erforderlich, keinesfalls gleichgewichtsnahe Verhältnisse möglich. Hier sind lediglich zwei irreversible Reaktionen in entgegengesetzter Richtung nacheinander abgelaufen und haben den beobachteten Bruttoeffekt hervorgebracht.

Reversibilität und Altern

Offensichtlich ist es also so, daß spontan ablaufende Prozesse, die grundsätzlich irreversibel sind, nur mit erheblichem Aufwand umgekehrt werden können. Auch alle Vorgänge, die an Bauwerken spontan ablaufen, gehören zu diesen irreversiblen Prozessen. Das gilt auch für restaurierende oder reparierende Baumaßnahmen, so sorgsam und behutsam sie auch durchgeführt werden mögen, auch für solche, die einen vorher einmal existierenden Zustand wiederherstellen – ganz zu schweigen von Rekonstruktionen. Der Grund ist die Unmöglichkeit der spontanen Entropieerniedrigung. Baumaßnahmen bewirken eine solche Entropieerniedrigung; daher bedingen sie einen je nach Lage der Dinge höheren oder niedrigeren Energieaufwand.

Die Geschwindigkeit, mit der spontane Vorgänge ablaufen, ist abhängig von der Entfernung der herrschenden Energiezustände von den Gleichgewichtszuständen. Ist diese Entfernung groß, laufen die Prozesse schnell ab, manchmal auch katastrophenartig: Dann sprechen wir von Zerstörung. Sind die Bedingungen nicht allzuweit vom Gleichgewicht entfernt, laufen auch die Reaktionen langsamer ab, und wir nennen diesen Prozeß Alterung.

Natürlich kann Alterung schließlich in Zerstörung münden; das ist lediglich eine Frage der Zeit, also des Andauerns bestimmter Verhältnisse. Irreversibel sind aber beide Arten von Vorgängen, also auch die Alterung.

Das gilt, wie wir aus eigener Erfahrung wissen, auch für Lebewesen: Lebensprozesse sind nicht reversibel. Die Alterung eines Bauwerks, einer Statue, eines Gemäldes kann ebensowenig rückgängig gemacht werden, auch nicht durch kunstreiche Eingriffe: Natürlich kann z.B. die Patina einer Statue oder der Rost eines Eisenbauwerks (Abb. 8) auf chemischen Wege wieder in das Metall zurückverwandelt werden – aber nur in ein loses Pulver, niemals in massives Metall. Eine korrodierte Statue erhält nicht ihr gußfrisches Aussehen zurück, wenn man die oberflächliche Korrosionsschicht rückverwandelt (mal abgesehen davon, ob man dies überhaupt möchte). Die scheinbare Reversion betrifft nur die **Materie**, nicht die **Form**. Diese wird durch einen Alterungsprozess irreversibel zerstört. Materie und Gestalt müssen bei Bauwerken und Kunstwerken gleichermaßen betrachtet werden. Beide unterliegen Veränderungsprozessen, die sämtlich ihrer Natur nach irreversibel sind.

Das Einziehen eines Stützkorsetts aus Stahlankern in ein Bauwerk ist unter Umständen eine (über-) lebenswichtige Maßnahme, aber sie ist nicht reversibel – selbst wenn die Anker wieder ausgebaut werden können. Die Form mag dadurch erhalten werden, nicht aber die Materie: Also eine irreversible Maßnahme. Verpressen oder „Versiegeln“ mit Kunstharzen, ja selbst mit „naturnäheren“ Stoffen, ist keineswegs reversibel: weder Materie noch Form bleiben unbeeinträchtigt, und zur Erniedrigung der Entropie muß ein erheblicher Energieaufwand getrieben werden. Zufügungen und Teilersatz bedingen offene Systeme, in denen erhebliche Energie- und Materieflüsse stattfinden: Dies ist typisch für irreversible Prozesse.

Gibt es reversible Maßnahmen in der Denkmalpflege?

Es ist natürlich notwendig, zur Erhaltung von Bauwerken und Kunstwerken in die spontanen irreversiblen Prozesse einzugreifen, um sie aufzuhalten oder zu verlangsamen; das ist selbstverständlich Zweck und edelstes Ziel der Denkmalpflege. Nur: Umkehren kann man diese Prozesse nicht. Es ist daher nicht angebracht, Baumaßnahmen zur Sanierung oder Restaurierung als reversibel zu bezeichnen, nur weil man ihre Folgen manchmal leicht und unter Hinterlassen minimaler Narben beseitigen kann. Natürlich ist es sinnvoll und höchst erwünscht, die notwendigen Maßnahmen so behutsam und schonend wie möglich durchzuführen, doch dadurch werden sie noch nicht reversibel. Weil alle Prozesse, die in der Natur ablaufen, eine definierte Richtung haben, gibt es auch in der Denkmalpflege keine Reversibilität.

Selbstverständlich ist es immer möglich, für einen Begriff eine Definition zu schaffen und mit dieser – insbesondere wenn weitreichender Konsens hierüber herbeigeführt werden kann – weiterhin zu argumentieren. So ist es mit der Einführung des Begriffes „Reversibilität“ in der Denkmalpflege geschehen, zum Gebrauch für Maßnahmen, die besonders schonend sind (oder dafür gehalten werden) und das Denkmal minimal beeinflussen oder beeinträchtigen: Hinzufügungen, die man leicht wieder fortnehmen kann, Unterstützungsmaßnahmen, die man durch andere ersetzen kann und so weiter. Aber: solche Operationen „reversieren“ ja nichts, sie sind auch ihrer Natur nach alles andere als reversibel, sondern, wie alle natürlich ablaufenden Prozesse, irreversibel. Und kann man Maßnahmen wirklich ungesche-

hen machen? Und kommt es durch Operationen an Denkmälern auch nur zum Stillstand der natürlichen Prozesse? Die Verwendung des Begriffes der **Reversibilität** in dieser Definition steht in scharfem Kontrast zum sonstigen Gebrauch. Sollte man dann nicht lieber davon lassen?

Anmerkungen

- 1 Der Begriff „System“ bedarf der Definition, da er vom alltäglichen Sprachgebrauch abweicht. Hier soll darunter ein historisches Monument oder ein Kunstgegenstand oder ein ähnliches Objekt in seiner Gesamtheit verstanden werden, also Material, Gestalt, Form und Zustand, unter Ausschluß seines Umfeldes. In einem „offenen System“ kann das Umfeld auf das Objekt einwirken, Material und Energie mit ihm austauschen. Dies ist der Normalfall für alle von uns studierten Objekte.
- 2 Die mit Δ bezeichneten Werte stellen Differenzen zwischen End- und Ausgangszustand dar. Wenn z.B. der Wärmehalt im Endzustand kleiner ist als im Ausgangszustand, ist die Differenz ΔH negativ; dies bedeutet, daß im Prozeß Wärme freigeworden, d.h. an die Umgebung abgegeben worden ist.
- 3 Die über die chemischen Symbole gesetzten Zahlen geben deren Ladungszustand an; Fe bedeutet neutrales, d.h. metallisches („gediegenes“) Eisen, Fe bedeutet positiv dreiwertige Eisen-Ionen. Gegenüber dem neutralen Eisen fehlen dem dreiwertigen drei Elektronen je Atom.
- 4 Hiervon macht man in der Praxis Gebrauch, indem man zum „Entrosten“ eine „Opferelektrode“ einbaut und zwischen dieser und dem zu entrostenden Gegenstand einen Strom fließen läßt. Die Opferelektrode wird oxidiert, also verbraucht, das zu schützende Metall entrostet, reduziert (elektrochemische Entrostung, Korrosionsschutz).