Redundanz – ein umfassender Begriff im Sicherheitsmanagement

von Klaus Kunigham

"Redundanz [lat. redundantia = "Überfülle"] In der Zuverlässigkeitstheorie ist Redundanz die Bezeichnung für den Teil des Material- oder Betriebsaufwands für ein technisches System, der [primär] für ein ordnungsmäßiges Funktionieren nicht erforderlich ("überflüssig") ist. Erhöht er auch die Zuverlässigkeit nicht, so spricht man von leerer Redundanz, andernfalls von nützlicher Redundanz."

r e d u n d a n t i a

1

2

Auf den ersten Blick ist die Forderung nach Redundanz in risikobehafteten Bereichen logisch, einfach und sinnvoll. Alles, was bei einem Versagen sicher oder mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einem Unfall führen würde, soll doppelt abgesichert werden. So einfach ist die Aussage. Diese Forderung wird in vielen Gebieten außerhalb von Outdoortrainings und erlebnispädagogischen Maßnahmen schon lange erhoben. Ein Prinzip, das z.B. im technischen Umfeld, der Arbeitssicherheit, der eindeutigen Informationsübertragung und vielen anderen Bereichen praktische Anwendung findet. Beispielhaft zu nennen sind das doppelte Bremssystem in Autos oder die zumindest in Deutschland mehrfach abgesicherten Kühlsysteme von Kernkraftwerken. Auch in der Natur finden sich redundante Systeme. Die beiden Nieren beim Menschen sind dafür ein Beispiel. Versagt eine Niere, so ist die zweite in der Lage, die Gesamtfunktion der Entgiftung des Körpers zu übernehmen. Zumindest so, dass man gut damit überleben kann. Ohne ins Detail zu gehen erscheint ein mit Redundanz betriebenes System als sicher.
Aber ist der Anspruch, alles doppelt abzusichern, was bei einem Versagen sicher oder mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einem Unfall führen würde, wirklich so einfach in der Praxis umzusetzen?

"Wir arbeiten redundant"

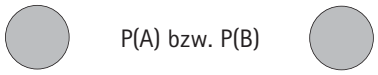
Bei vielen Anbietern oder auch in vielen Veröffentlichungen zum Thema Sicherheit bei Trainings oder erlebnispädagogischen Maßnahmen wird aus Sicherheitsgründen Redundanz gefordert. Das ist gut und richtig so. Allerdings bleibt nach diesen Aussagen meist unklar, was genau im Einzelnen darunter verstanden wird. Betrachtet man die einzelnen Systeme und Situationen genauer, so findet man häufig die Probleme im Detail. Nicht selten müsste man korrekt von teilredundanten Systemen sprechen. Was auf den ersten Blick als Haarspalterei erscheinen mag, hat gravierende Auswirkungen auf die Diskussion dessen, was als sicherer Aufbau verstanden wird oder verstanden werden kann. Denn teilredundante Systeme kommen in der Praxis häufig vor, sie sind eigentlich die Regel. Daher sollte auch offen und intensiv darüber diskutiert und begründet werden, warum eine Teilredundanz vielleicht an manchen Stellen ausreicht, bzw. wo wirklich redundant gearbeitet werden muss. Dazu aber später. Darüber hinaus ist es fast schon die Regel, dass unter dem Begriff Sicherheit die physische als auch die psychische Sicherheit der Teilnehmer verstanden wird. Zumindest wird das in vielen Ausschreibungen offeriert und in vielen Publikationen gefordert. Aussagen wie: "Wir arbeiten redundant und garantieren für die physische und psychische Sicherheit unserer Teilnehmer" sind prägnant und in der Werbung hilfreich, aber auch undifferenziert und halten einer genauen Prüfung kaum stand. Keinerlei Informationen fand ich z.B. darüber, ob auch eine Redundanz im psychischen Bereich gemeint ist und was darunter konkret verstanden werden könnte. Die folgenden Überlegungen zur Redundanz sollen sich zunächst auf die physische Sicherheit der Teilnehmer beschränken und an Beispielen verdeutlicht werden.

1 **Parallel geschaltete Elemente.** Versagt ein Karabiner, kann der zweite seine Funktion übernehmen. Das Seil bzw. die Anseilschlaufe sind nicht redundant. Es handelt sich also um ein teilredundantes System. Welche Elemente unbedingt redundant ausgeführt werden müssen und welche nicht, bedarf einer kontinuierlichen Diskussion.

2 **Versagensbereich "Mensch".** Die zwei Karabiner für das Toprope sind versehentlich in eine Materialschlaufe eingehängt worden. Die Materialredundanz durch die beiden Karabiner hilft in diesem Fall wenig weiter. Da die Versagensbereiche "Material", "Funktion" und "Mensch" in Reihe geschaltet sind, führt ein Versagen in einem der drei Bereiche zwangsläufig zum Gesamtversagen des Systems. Das "Vier-Augen-Prinzip" oder der "Partner-Check" könnten dieses Versehen allerdings durchaus aufdecken und sind hier ein sinnvolles Beispiel einer Kontrolle und damit einer Redundanz im menschlichen Handeln.

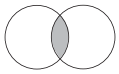
Einige Grundlagen der Wahrscheinlichkeitstheorie

Ein kurzer Blick in die Grundlagen der Wahrscheinlichkeitstheorie soll dem weiteren Verständnis dienen. Zudem sollen Aussagen aus den theoretischen Überlegungen für das praktische Handeln abgeleitet werden. Nennen wir die Eintrittswahrscheinlichkeit zweier unabhängiger Ereignisse P(A) bzw. (P)B.:



Praktisch könnten das die Wahrscheinlichkeiten zweier Karabinerbrüche A bzw. B darstellen. Die Karabiner sollen sich dabei allerdings nicht gegenseitig in ihrer Funktion, Festigkeit und Belastung beeinflussen oder voneinander abhängen. Mathematisch gesprochen handelt es sich dann um unabhängige Ereignisse. Dann errechnet sich die Wahrscheinlichkeit, dass das Ereignis A und ($\cap$) das Ereignis B eintritt aus:

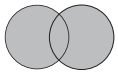
$$P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B) \qquad (1)$$



Praktisch errechnet sich aus Gleichung (1) die Wahrscheinlichkeit, mit der die beiden unabhängig voneinander eingesetzt funktionierenden Karabiner gleichzeitig brechen.

Die Wahrscheinlichkeit, dass das Ereignis A oder ($\cup$) das Ereignis B eintritt, ergibt sich aus:

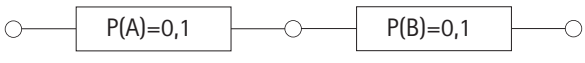
$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B) \qquad (2)$$



Wiederum praktisch betrachtet handelt es sich bei dem Ergebnis der Gleichung (2) um die Wahrscheinlichkeit, mit der entweder der Karabinerbruch A oder der Bruch B oder beide gleichzeitig erfolgen.

Aus Sicht der Wahrscheinlichkeitstheorie sind die Gleichungen (1) und (2) bei unseren weiteren Überlegungen zur Redundanz eines Systems von Bedeutung. Denn praktisch ergeben sich zwei prinzipielle Kombinationsmöglichkeiten von Bauelementen. Betrachten wir zunächst einmal einfache Systeme aus zwei Elementen, denen wir die Eintrittswahrscheinlichkeiten eines Versagens von P(A) = 0,1 (also 10 %) und P(B) = 0,1 (also auch 10 %) zuordnen (die Werte für P(A) und P(B) sollen hier nur als Rechenbeispiel dienen. Es sind keine Aussagen über konkrete Versagenswahrscheinlichkeiten bei Outdoor-Maßnahmen). Die Sicherheit oder Zuverlässigkeit würde sich dann jeweils zu 1 - P(A) = 0,9 (90 %) bzw. 1 - P(B) = 0,9 (90 %) ergeben.

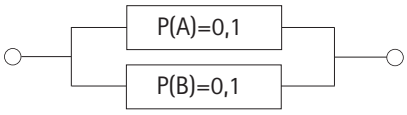
Nun ergeben sich zwei prinzipielle Möglichkeiten:
Einmal lassen sich die beiden Elemente in Reihe, also hintereinander, anordnen.



Es ist leicht einzusehen, dass beim Versagen eines der Bauteile das ganze System versagt. Die Versagenswahrscheinlichkeit des Gesamtsystems würde sich in dem Fall errechnen zu

P(A B) = P(A) + P(B) - P(A B), also mit einer Oder-Verknüpfung. Mit unseren angenommenen Werten würde sich die Gesamt-Versagenswahrscheinlichkeit zu P(A B) = 0,1 + 0,1 - 0,1´0,1 = 0,19 (19 %) ergeben. Die Sicherheit oder Zuverlässigkeit des Systems beträgt dann 1 - P(A B) = 0,81 (81%).
Konkret könnte es sich hier um zwei Karabiner handeln, die ineinander gehängt belastet werden. Bricht einer, kann der zweite die Belastung auch nicht mehr aufnehmen. Solche in Reihe gebauten Systeme treffen wir in alltäglichen Aufbauten in Trainings häufig an. Ein Beispiel stellt eine Expressschlinge dar, die aus den Elementen Karabiner, Bandschlinge, Karabiner besteht.
Ein anderes Beispiel ist das Topropeklettern. In der Einbindeschlaufe des Gurtes hängt der HMS-Karabiner, mit dem das Seil mittels HMS über einen Umlenkkarabiner zum Schrauber führt, mit welchem der Kletterer in der Einbindeschlaufe seines Gurtes eingehängt wird. Eine typische Reihenschaltung aus mindestens 6 Elementen. Jenachdem, wie genau man das Ganze betrachtet, könnte man weitere Elemente differenzieren, beispielsweise die Schlaufe mittels Sackstich, in die sich der Kletterer mit seinem Schrauber einhängt usw.

Die zweite prinzipielle Möglichkeit, die beiden Bauteile anzuordnen, besteht darin, sie parallel, also nebeneinander, zu verbinden.



Im Gegensatz zur obigen Anordnung in Reihe ist hier zu erkennen, dass beim Versagen eines der beiden Bauteile das zweite dessen Funktion übernehmen kann. Dies stellt das einfachste Beispiel eines redundanten Systems dar. Die Versagenswahrscheinlichkeit des Gesamtsystems würde sich in dem Fall errechnen zu $P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B)$, also mit einer Und-Verknüpfung.
Mit unseren angenommenen Werten würde sich die Gesamt-Versagenswahrscheinlichkeit zu $P(A \cap B) = 0,1 \cdot 0,1 = 0,01$ (1%) ergeben. Die Sicherheit oder Zuverlässigkeit des Systems beträgt dann 1 - 0,01 = 0,99 (99 %).
Als Beispiel aus der Praxis kann die redundant aufgebaute Umlenkung eines Topropes genannt werden. Dabei sollen die beiden Elemente jeweils aus einem Fixpunkt mit Ring bestehen, in den jeweils das Seil eingefädelt ist. Bricht z.B. einer der Fixpunkte, so wird das Seil vom zweiten gehalten.
Vergleicht man mit den angenommenen Werten die Gesamt-Versagenswahrscheinlichkeit der beiden Anordnungen "Reihe" und "Parallel", so erkennt man leicht den gravierenden Unterschied. Einmal ergibt sich aus zwei jeweils 90 % zuverlässigen Bauteilen ein System mit einer reduzierten Zuverlässigkeit von 81% (Reihenschaltung), das andere mal erreicht man eine erhöhte Systemzuverlässigkeit von 99 % (Parallelschaltung / Redundanz)

Bemerkung
Verwendet man anstatt der zur Veranschaulichung angenommenen Versagenswahrscheinlichkeiten von 0,1 z.B. einen Wert von 0,0001 (angenommen bei jeder 10.000sten Seilbrückenbegehung in nicht redundantem Aufbau käme es zu einem schweren Unfall), so würden sich statistisch für einen redundanten Aufbau eine Versagenswahrscheinlichkeit von $0,0001 \cdot 0,0001 = 0,00000001 = 10^{-8}$ ergeben. Der absolute Unterschied zwischen nicht redundantem und redundantem Aufbau beträgt dann 0,0001 - 0,00000001 = 0,000099990. Absolut gesehen bringt der Aufwand der Redundanz damit nur eine Reduktion der Versagenswahrscheinlichkeit von $9,999 \cdot 10^{-5}$. Das Risiko für die Teilnehmer, bei einer Seilbrücke in redundantem Aufbau schwer zu verunfallen, hat sich aber gravierend verändert: Das Risiko ist um ca. das 10.000-fache verringert! In redundantem Aufbau würde dann statistisch gesehen nur bei jeder 100.000.000sten Seilbrückenbegehung ein schwerer Unfall eintreten. (Vorausgesetzt, dass durch den erhöhten Aufwand und Komplexitätszuwachs eines redundanten Aufbaus nicht eine zusätzliche, kleine Erhöhung des Einzel-Versagensrisikos eintreten würde. Die allerdings angesichts der Zahlen kaum ins Gewicht fallen dürfte.) Je geringer die Ausgangsversagenswahrscheinlichkeit ist, desto gravierender - und in unserem Sinne positiv - verringert sich das Risiko.

→ Fazit
Drei prinzipielle qualitative Aussagen lassen sich aus den mathematischen Verknüpfungen der Gleichungen (1) und (2) ableiten.

- Mit der Anzahl der Elemente einer Reihenschaltung steigt die Gesamt-Versagenswahrscheinlichkeit des Systems. Die Gesamt-Versagenswahrscheinlichkeit ist immer höher als die größte Einzel-Versagenswahrscheinlichkeit der Elemente.
- Parallel geschaltete Elemente verringern die Gesamt-Versagenswahrscheinlichkeit im Vergleich zu den einzelnen Versagenswahrscheinlichkeiten der Elemente. Die Gesamt-Versagenswahrscheinlichkeit ist immer geringer, als die kleinste Einzel-Versagenswahrscheinlichkeit.
- Sobald die verwendeten Elemente, egal in welcher Anordnung, eine Versagenswahrscheinlichkeit > 0 aufweisen (und das ist praktisch immer der Fall, wenn man erlebnispädagogische Aufbauten betreibt), ist absolute Sicherheit (100 %) nicht zu erreichen. Die Versagenswahrscheinlichkeit ist dann immer > 0, wenngleich sie auch mit entsprechend redundanten Systemen nahe 0 gedrückt werden kann. Ein Restrisiko bleibt bei allen Aufbauten und Übungen.

Der kurze theoretische Exkurs belegt, dass redundante Systeme sehr sinnvoll sind und die Sicherheit deutlich erhöhen können, sobald bei einem Versagen des Systems Leib und Leben in Gefahr sind. Er zeigt aber auch, dass eine absolute Sicherheit praktisch nicht zu erreichen ist.

Von der Theorie zur Praxis

Versuchen wir diese einfachen Aussagen aus der Theorie in die Praxis zu übertragen, so stoßen wir auf die bereits genannten Probleme im Detail. Eine wesentliche Vorraussetzung in den obigen Gleichungen und Rechnungen ist die Unabhängigkeit der Ereignisse. Eine zweite Voraussetzung, um quantitative Aussagen zu machen, ist die Kenntnis der Einzelwahrscheinlichkeiten eines konkreten Ereignisses. Zudem ist die komplexitätssteigernde Tatsache der Praxis die, dass erlebnispädagogisch genutzte Aufbauten in der Regel ja nicht nur aus zwei, sondern aus einer ganzen Reihe von Bauteilen bestehen, die darüber hinaus häufig ein Gemisch aus in reihe- und parallelgeschalteten Bauelementen darstellen. Und über den Bereich der technischen oder mechanischen Versagensmöglichkeiten hinaus spielt das weite Feld der Fehlbedienungen und des menschlichen Versagens eine entscheidende Rolle. Betrachtet man die Unfall- und Vorfallberichte, so sieht man, dass das rein technische Versagen von Bauteilen wie Seilrisse, Karabinerbrüche, Hakenausrisse usw. sehr selten ist. Viel häufiger sind Funktionsversagen oder menschliches Versagen dokumentiert.

Unabhängigkeit von Ereignissen

Dass nicht alle Fehlerereignisse unabhängig sind, lässt sich an einfachen Beispielen zeigen. Nehmen wir zum Beispiel zwei Bohrhaken A und B, die in einem Abstand von ca. 30 cm als Fixie-

rungspunkte für eine Umlenkung beim Topropeklettern verwendet werden. Vorbildlich führt von jedem der beiden Bohrhaken eine Bandschlinge zu den beiden Schraubkarabinern, durch die das Seil umgelenkt wird. Bricht unter Belastung der Bohrhaken A aus dem Fels, und der zweite Haken B hält der Belastung stand, hat der redundante Aufbau seinen Sinn erfüllt. Eben, weil die beiden Bohrhaken unabhängig voneinander funktionieren. Nicht mehr unabhängig voneinander funktionieren die Bohrhaken, wenn sie z.B. schlecht auf einer Schuppe platziert sind und nicht die Festigkeit oder Haltekraft jedes einzelnen Bohrhakens im Fels, sondern vielmehr die Festigkeit oder Haltekraft der Schuppe zum restlichen Fels ausschlaggebend ist. In diesem Fall würde bei Belastung die Schuppe mit beiden Bohrhaken aus dem Fels brechen. Die Versagenswahrscheinlichkeiten, "Bohrhaken A bzw. B hält der Belastung nicht stand", sind in diesem Fall nicht mehr unabhängig. Eine entsprechend der obigen Begriffsdefinition nützliche Redundanz wäre trotz "redundantem Aufbau" in diesem Fall nicht gegeben. Hier wird von leerer Redundanz gesprochen.
Die praktische Beurteilung, ob Ereignisse unabhängig sind, ist mitunter weder einfach noch eindeutig. Inwieweit dürfen beispielsweise zwei Bandschlingen, die an einem Baum befestigt sind, als redundante und unabhängige Fixpunkte zweier Seile für eine Seilbrücke bewertet werden? Zwar birgt ein gesunder, kräftiger Baum mit einem Durchmesser von 50 cm in den allermeisten Fällen wohl das geringste Risiko. Wie aber beurteilen wir die Grenzfälle? Wie dünn darf der Baum oder Ast sein? Wie gehen wir mit Situationen um, die wir nicht beurteilen können, weil uns entsprechendes Wissen fehlt oder die Wahrnehmung der Risiken für uns nicht möglich ist?
In technischen Bereichen wird häufig die Diversifikation angewandt, um mit möglichst großer Wahrscheinlichkeit eine Unabhängigkeit zweier oder mehrerer Ereignisse zu erreichen.
Z.B. wird die Überdrehzahl-Notabschaltung großer Wasserturbinen mittels zweier ganz unterschiedlicher Drehzahlaufnehmer gesteuert. Zum Einsatz kommt erstens ein elektrischer Drehzahlmesser mit einem entsprechenden Eingang auf dem elektronischen Regler der Turbine. Zweitens wird eine komplett mechanisch ausgeführte Drehzahlbestimmung vorgenommen. Würde aus irgend einem Grund die gesamte elektrische bzw. elektronische Seite gestört, könnte ein zweiter elektrischer Aufnehmer nicht helfen. Der mechanische Drehzahlmesser ist dagegen in seiner Funktion nicht gestört und kann die Maschine bei Überdrehzahl stoppen. Auch in der eindeutigen und redundanten Datenübertragung wird häufig mit der Diversifikation parallel geschalteter Elemente gearbeitet, da bei bau- und prinzipgleichen Hard- und Softwarebauteilen keine Redundanz gegenüber prinzipiellen Versagen besteht.
Im obigen Beispiel mit den beiden parallel geschalteten Bohrhaken würde eine Diversifikation erreicht, wenn anstatt des zweiten Bohrhakens ein dicker Baum der nebenan steht als zweiter Fixpunkt verwendet würde. Ein anderes Beispiel ist das gegenläufige Einhängen zweier Sicherungskarabiner in eine Sicherungsleine. Öffnet sich einer der Karabiner ungewollt, weil sein Schnapper auf die linke Seite weist, so kann der zweite aus dem gleichen Grund nicht öffnen, weil sein Schnapper auf der entgegengesetzten Seite liegt.

Irgendwann ist dann aber Schluss ...
Wer sagt´s denn, es geht doch redundant.

→ Fazit
Die Unabhängigkeit von Ereignissen ist häufig gegeben, aber nicht immer leicht explizit zu bestimmen! Vorsicht und ggf. auch Diversifikation von Ereignissen können für die Praxis empfohlen werden.

Die Einzelwahrscheinlichkeiten möglicher Versagensereignisse

Die Eingangs dargelegte mathematische Betrachtung aus der Wahrscheinlichkeitstheorie sollte dem prinzipiellen Verständnis dienen. Die oben zur Veranschaulichung angenommenen Versagenswahrscheinlichkeiten müssen selbstverständlich in allen sicherheitsrelevanten Bereichen, in denen Menschen zu großem Schaden kommen können, möglichst nahe Null gebracht werden.
Wie sieht es nun aber in der Praxis aus?
Würde man zu den vorherigen Überlegungen quantitative Aussagen zum Risiko einzelner Aktionen errechnen wollen, so müsste man in die Gleichungen relevante und quantitative Werte zu Versagenswahrscheinlichkeiten einzelner Ereignisse einsetzen. Für

den Bereich der erlebnispädagogisch eingesetzten Übungen und mobilen Aufbauten sind mir bislang allerdings keine entsprechend groß angelegten Studien oder Untersuchungen, die allgemein relevante und quantitative Werte zu den technischen, funktionellen oder menschlichen Versagenswahrscheinlichkeiten einzelner Ereignisse angeben, bekannt.
Ein Untersuchungsdesign, aus dem quantitative und vor allem für den Einzelfall relevante Aussagen hervorgehen würden, ist schwer zu erstellen, da z.B. im Bereich der mobilen Aufbauten keine einheitlichen Standards im Aufbau oder Betrieb angewendet werden. Etwas mehr Standard als bei mobilen Aufbauten wird in Hochseilgärten angewendet. Am ehesten noch lassen sich quantitative Aussagen zu den technischen Materialkennwerten der Bauteile wie Seile, Bänder, Karabiner usw. machen, da es für diese auch verbindliche Normen mit Mindeststandards gibt. Aber auch hier sind quantitative Aussagen über die Versagenswahrscheinlichkeit der Funktion - z.B. ungewolltes Öffnen eines HMS-Karabiners - einzelner Bauteile nicht bekannt. Abschätzungen ließen sich allenfalls über das Sammeln von Teilnehmermengendaten sowie Vorfall- und Unfallberichten erreichen.
Bekannt sind hingegen konkrete Unfälle, bei denen Personen zu Schaden oder sogar zu Tode gekommen sind. Auch Beinahe-Unfälle, bei denen um ein Haar ein Unfall passiert wäre, sind beschrieben. Statistisch haltbare Aussagen lassen diese Unfälle sicher nicht zu, jedoch können qualitative Aussagen über Bereiche mit erhöhtem Risikopotential gemacht werden. Sammelt ein Anbieter konsequent solche Vorfälle bei seiner Tätigkeit, so sind diese qualitativen Aussagen darüber hinaus für ihn auch noch sehr spezifisch und relevant. Sind einmal Bereiche mit erhöhtem Risikopotential erkannt, so können dann entsprechende Maßnahmen und Handlungen diskutiert und Aussagen und Regeln zu sichererem Verhalten abgeleitet werden.

→ Fazit
Allgemeine quantitative Werte zu einzelnen Versagenswahrscheinlichkeiten sind im Outdoor-Bereich nicht bekannt. Sammeln und auswerten von Vor- und Unfällen hilft aber, Felder mit erhöhtem Risiko qualitativ zu erfassen. Daraus können dann Aussagen und Regeln zu sichererem Verhalten abgeleitet werden.

Die Kombination mehrerer Bauteile

Wie schon in den Erläuterungen zur Reihenschaltung am Beispiel des Topropekletterns ausgeführt, handelt es sich in den meisten Fällen um Aufbauten und Aktionen, die aus einer ganzen Reihe von Einzelteilen oder Elementen wie Gurte, Karabiner, Seile, Bänder, Hölzer, Haken usw. verbunden werden. Mit der Menge der Einzelteile steigt dann auch die Komplexität des Systems.

→ Fazit
Wenige und möglichst sichere Elemente in Reihe, und diese redundant gekoppelt, beinhalten das geringste Gesamtrisiko.

Teilredundanz

Betrachten wir zwei Kletterer, die entsprechend der vom DAV zur Zeit anerkannten Lehrmeinung im Toprope klettern: In der Einbindeschlaufe (Hüftgurtring) des Sicherers hängt der HMS-Karabiner, durch den das Seil mittels HMS über eine redundante Umlenkung zur Seilschlaufe (Achter- oder Sackstichschlinge) und zu den zwei Schraubern führt, mit welchen sich der Kletterer in der Einbindeschlaufe seines Gurtes eingehängt hat. Beim Partner-Check wurde von beiden Beteiligten kontrolliert, dass erstens die Gurte richtig geschlossen sind, zweitens das Seil richtig im HMS liegt und das Einhängen und Schließen der beiden Schrauber des Kletterers korrekt ist. Schon aus dem Text wird die Mischung aus parallelen und damit redundanten Teilen und solchen, die in Reihe und damit nicht redundant gehalten sind, deutlich. Die beschriebene Situation ist auf der nächsten Doppelseite in strukturierter Form visualisiert. Bei der Darstellung der Teilelemente wäre es denkbar, noch weiter ins Detail zu gehen. So bestehen die Umlenkungen vielleicht aus jeweils einem Bohrhaken und einem Schrauber in Reihe. Blicken wir zurück auf die mathematischen Verknüpfungen, so wird schnell deutlich, dass mit zunehmender Komplexität einer solchen Kette das Abschätzen von Gesamtrisiken deutlich schwieriger wird. Insbesondere dann, wenn für die einzelnen Elemente der Kette keine quantitativen Versagenswahrscheinlichkeiten vorliegen.

Betrachten wir die obige Kette, so sehen wir eine Reihenschaltung von Elementen. Einige dieser Elemente in Reihe sind darüber hinaus parallel geschaltet, also redundant. Das System als Ganzes ist eindeutig nicht redundant. Das Versagen einer der beiden Einbindeschlaufen oder des Seiles führt zwangsläufig zum Versagen des gesamten Systems. Dagegen würde ein nicht korrekt geschlossener Klettergurt mit hoher Wahrscheinlichkeit bei der Überprüfung durch den Partner-Check auffallen und noch rechtzeitig richtig geschlossen werden können. Hier handelt es sich also um ein teilredundantes System. Redundant abgesichert werden dabei die Elemente, von denen wir glauben oder wissen, dass sie mit einem höheren Risiko des Versagens behaftet sind. Dagegen sind Elemente, von denen wir glauben oder wissen, dass sie mit einem sehr, sehr geringen Versagensrisiko behaftet sind, nicht redundant ausgeführt. Z.B. ist noch kein Seilriss beim Topropen bekannt geworden und es ist auch extrem unwahrscheinlich, dass dieser Fall eintritt, außer vielleicht bei einer Vorschädigung des Seiles z.B. durch Batteriesäure. Diese Teilredundanz, wie sie in der Praxis vielfältig vorkommt, muss Anlass für eine intensive Diskussion sein, welche Elemente jeweils unbedingt redundant ausgeführt werden sollen und welche nicht redundant ausgeführt sein müssen. Eine solche Diskussion wird nicht abschließend zu führen sein, weil sich Materialien ändern oder neues Material entwickelt wird, neue Erkenntnisse entstehen, unterschiedliche Situationen differenziert betrachtet werden müssen oder Unfälle eintreten, die bis dahin für nahezu ausgeschlossen gehalten wurden. Auch Veränderungen im menschlichen Verhalten, der Risikowahrnehmung oder Rechtsprechung werden immer wieder neue Aspekte in diese Diskussion tragen, die damit zu einem kontinuierlichen Prozess wird.

Konkrete Beispiele zu teilredundanten Systemen

■ In einem Hochseilgarten werden die Teilnehmer bei einer Aktion über zwei Topropes gesichert, deren Umlenkungen an zwei verschiedenen Stahlseilen angebracht sind. Die Gurte sind redundant konstruiert. Beide Stahlseile sind zwischen den beiden Masten aufgehängt. Die Masten sind jeweils einmal entgegen der Zugrichtung des Sicherungsseiles nach hinten abgespannt. Auch hier handelt es sich genau genommen um ein teilredundantes System. Bräche einer der Masten, würde das Gesamtsystem versagen. Vorschriften und Sicherheitsabnahmen wirken hier entgegen. Sicherheitsabnahmen stellen damit eine weitere Art der Redundanz dar. Eine Redundanz, die dann sozusagen über den Zeitraum bis zur nächsten Kontrolle anhalten soll.

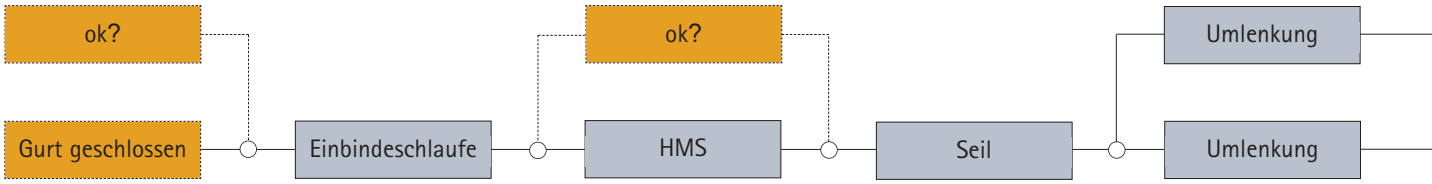
■ Ein erfahrener Trainer baut mit Seilen eine abgehängte Umlenkung für das Sicherungsseil eines Leitersprunges auf. Er weiß aus Messungen und Rechnungen, welche Belastungen maximal zu erwarten sind. Darüber hinaus kennt er die Kenndaten seines eingesetzten Materials. Daraus ergibt sich ein Sicherheitsfak-

1 **In Reihe geschaltete Elemente.** Karabiner - Schlinge - Karabiner. Versagt ein Bauteil, versagt das ganze System "Expressschlinge". Mit der Anzahl der involvierten Einzelteile steigt auch die Komplexität des Systems.

2 **Sind zwei Ereignisse voneinander tatsächlich unabhängig?** Diversifikation durch gegengleiches Einhängen von Karabinern in eine Sicherungsleine. Öffnet einer der Karabiner ungewollt durch eine Belastung, die von einer Seite her einwirkt, so öffnet der zweite mit großer Wahrscheinlichkeit nicht aus dem gleichen Grund.

3 **Versuch einer Funktionsredundanz.** Die Funktion "Verschluss gesichert" ist bei diesem DMM-Karabiner doppelt abgesichert. Genau genommen handelt es sich allerdings auch nicht um ein wirklich funktionsredundantes System, da die beiden Verschlusssicherungen nicht unabhängig voneinander wirken. Der Plastikbügel kann die Funktion "Verschlusssicherung" nicht alleine erfüllen und damit handelt es sich nicht um zwei unabhängige Ereignisse. Dennoch, ein praktikabler Schritt in Richtung Sicherheit.

4 **Versagenswahrscheinlichkeiten reduzieren.** Ein weiterer Vorteil dieses Karabiners ist die Fixierung des Achters. Er kann nicht ungewollt auf den Schnapper rutschen. Eine Querbelastung des Karabiners ist dadurch eher unwahrscheinlich.



Teilredundanz am Beispiel Topropeklettern
Betrachten wir die obige Kette, so sehen wir eine Reihenschaltung von Elementen. Einige dieser Elemente in Reihe sind darüber hinaus parallel geschaltet, also redundant. Das System als Ganzes ist eindeutig nicht redundant.

tor gegen Materialversagen, der selbst im ungünstigsten Fall noch z.B. sechs beträgt. Das System ist materiell eindeutig nicht redundant aufgebaut, wird aber vor der Benutzung durch einen zweiten Trainer bezüglich des korrekten Aufbaus kontrolliert. Auch hier kann man von einem teilredundanten System sprechen, da die Handlung ´Aufbauen durch den Trainer´ von einer zweiten fachkundigen Person überprüft und bestätigt wurde.

■ Aus dem Unfallbericht vom "Kanzianiberg": "Der Aufbau der Seilbahnaufhängung erfolgte stets nach folgendem Schema: Am Stahlseil läuft eine Seilrolle "Tandem Cable" der Firma Petzl, die Redundanz der zwei Seile wird durch eine Bandschlinge hergestellt, die mittels je einem Twistlockkarabiner an der Seilrolle bzw. am Kletterseil fixiert ist. In der unteren Öse der Seilrolle wird über einen weiteren Twistlockkarabiner eine V-förmige Bandschlinge (Petzl "Energyca") befestigt.
Über ein Ende dieser Schlinge wird die Geschwindigkeit der Seilbahn gesteuert, wozu ein separates Kletterseil vom jeweiligen Bergführer über ein Sicherungsgerät bedient wird. Das zweite Ende der "Energyca-Schlinge" ist durch eine doppelt genommene, 60 cm lange Bandschlinge verlängert. Diese Bandschlinge soll zum einen gewährleisten, dass die Schüler mit den Händen nicht zum Stahlseil greifen können, weiters erlaubt diese Verlängerung ein bequemeres und sicheres "Landen" auf der gegenüberliegenden Seite der Schlucht. Die zwei Schlaufen der Bandschlinge sind in einem Twistlockkarabiner (DMM "Wales") zusammengeführt, der den Aufhängepunkt für die Seilbahnbenutzer darstellt."
Auch hier handelt es sich eindeutig wieder um ein teilredundantes System. In diesem dramatischen Fall war die Teilredundanz zu wenig und es kam zu einem tödlichen Unfall.

→ Fazit
Nimmt man Aufbauten im Outdoor-Bereich unter die Lupe, so muss man in der Regel von teilredundanten Systemen sprechen, die häufig aus einem Gemisch aus Reihen- und Parallelschaltungen aufgebaut sind. Eine kontinuierliche Diskussion, welche Elemente jeweils unbedingt redundant ausgeführt werden sollen und welche nicht redundant ausgeführt sein müssen, ist notwendig.

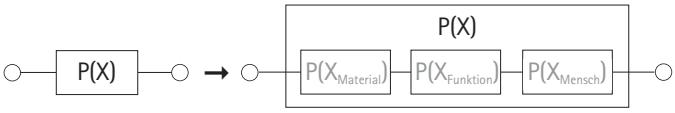
Drei Versagensbereiche

Jedes Bauteil mit einer Gesamt-Versagenswahrscheinlichkeit P(X) kann in drei prinzipielle Versagensbereiche gegliedert werden, die ihrerseits wieder in Reihe geschaltet sind. Es kann das Material des Bauteils $P(X_{Material})$ oder dessen Funktion $P(X_{Funktion})$ versagen oder es kann beim Handling mit dem Material ein Fehler auftreten $P(X_{Mensch})$. Dies wird dann häufig auch als menschliches Versagen bezeichnet.
Am einfachen Beispiel des Bremssystems beim Auto kann das praktisch erläutert werden. Ein genauer Blick auf das ganze System Bremse zeigt, dass es in die drei erwähnten Versagensbereiche, die ihrerseits in Reihe angeordnet sind, unterteilt werden kann. Bricht z.B. der Hebel des Bremspedals $P(X_{Material})$, nützt einem das beste Bremssystem, das nach dem Hebel anschließt, nichts. Oder versagt die Funktion $P(X_{Funktion})$ des Hauptbremszylinders, weil dieser blockiert, fällt das System Bremse auch aus. Oder, ist der Fahrer gar im entscheidenden Moment nicht bei der Sache $P(X_{Mensch})$ und betätigt die Bremse nicht, fällt das System ebenfalls als Ganzes aus.
Auf unseren Kontext bezogen, lassen sich unter anderem folgende Beispiele anführen:

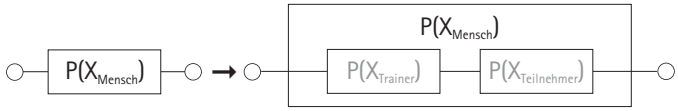
■ **Materialversagen**
Seilriss, quer belasteter Karabiner bricht, usw.

■ **Funktionsversagen**
ungewolltes selbständiges Aushängen eines mit Verschlusssicherung versehenen Karabiners, Seil schnappt im Achter zum Ankerstich um, usw.

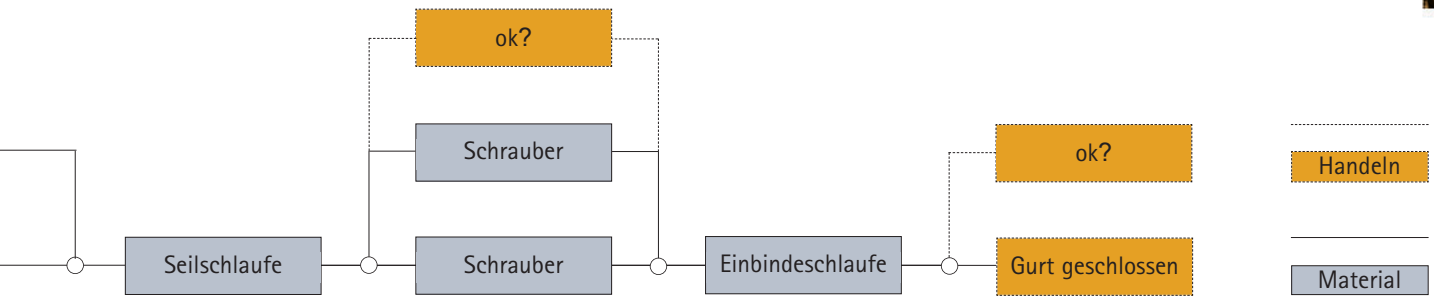
■ **menschliches Versagen**
Karabiner wird nicht in die Einbindeschlaufe sondern in eine Materialschlaufe eingehängt, falscher Karabiner wird versehentlich ausgehängt, das Toprope-Seil ist beim Ablassen zu kurz und ohne Knoten versehen, usw.



Diese Unterteilung macht für eine praktische Betrachtung Sinn, da in Unfallberichten Versagen von "Bauteilen" in den drei Bereichen Material, Funktion und Mensch zu finden sind. Folglich erscheinen auch Handlungsüberlegungen in den drei Bereichen notwendig, um solchen Versagen vorzubeugen.
Des weiteren möchte ich eine Unterteilung des menschlichen Versagens vornehmen. Durch Unfallberichte belegt, kann ein Versagen auf Seiten des Trainers (Aufbaufehler oder -versäumnisse, Mängel im Briefing, usw.) von einem menschlichen Versagen auf Seiten der Teilnehmer (Bedienungsfehler, nicht befolgen von Verhaltens- und Handlungsanweisungen, Ungeübtheit, Nichtwissen usw.) unterschieden werden.



Dipl. Ing. Klaus Kunigham, 39, studierte Physik und Sportwissenschaften und arbeitet als freiberuflicher Berater und Trainer vorwiegend für Führungskräfte und Teams.



Das Versagen einer der beiden Einbindeschlaufen oder des Seiles führt zwangsläufig zum Versagen des gesamten Systems. Dagegen würde ein nicht korrekt geschlossener Klettergurt mit hoher Wahrscheinlichkeit bei der Überprüfung durch den Partner-Check auffallen und noch rechtzeitig richtig geschlossen werden können.

Eine solche Unterscheidung ermöglicht es, Verhalten und Handlungen von Trainern und Teilnehmern differenzierter zu betrachten. Denn abgesehen davon, dass jedem Menschen ein Fehler unterlaufen kann, sollten die Trainer ja einen deutlichen Vorsprung an Erfahrung, Übung und Fachwissen aufweisen. So ist es bestimmt unterschiedlich zu betrachten und zu bewerten, ob ein vollkommener Anfänger oder ein erfahrener Kletterer und Trainer beim Klettern ohne Back up eine Person sichert oder ablässt.

→ Fazit
Eine differenzierte Betrachtung der Versagensbereiche Material, Funktion, Mensch-Trainer und Mensch-Teilnehmer macht Sinn, wenn man in eine Diskussion um die Sicherheit von konkreten Aufbauten oder Situationen einsteigt. Denn in diesen unterschiedenen Bereichen können dann differenzierte Überlegungen und Empfehlungen erarbeitet werden.

Redundanzarten

Eine weitere Dimension der Diskussion wird deutlich, wenn wir uns das Schaubild über die Situation beim Topropen noch einmal ansehen. Zählen von einer zweiten Person kontrollierte Karabiner, ob diese korrekt verschlossen und eingehängt sind, als redundant? Wie sind redundante Kontrollen im menschlichen Handeln gegenüber redundanten Systemen auf Seiten des Materials zu beurteilen? Wie können, sollen oder dürfen Redundanzen im menschlichen Handeln mit Redundanzen beim Material kombiniert werden?
Einleuchtend ist, dass eine Redundanz auf der Ebene des menschlichen Handelns wie z.B. der Kontrolle, dass der Gurt richtig geschlossen ist, kein klassisches Materialversagen absichert. Auf der anderen Seite sind zwei "redundante" Karabiner, die in ein falsches Seil eingehängt werden, wenig hilfreich. Hier kann ein Partner-Check, eine Kontrolle und damit Redundanz des menschlichen Handelns erhöhte Sicherheit bringen.
Bei der Betrachtung der Unfalldaten zeigt sich selten reines Materialversagen. Bei den Materialien scheint sich der langjährige Verbesserungsprozess der letzten Jahrzehnte, der teilweise bis zu internationalen Normen geführt hat, auszuzahlen. Viel häufiger handelt es sich bei den Unfällen um Funktionsversagen einzelner Bauteile, um ein Versagen im Handling oder den falschen Einsatz der Materialien. Die bereits genannten Versagensbereiche lassen sich durch unterschiedliche Arten der Redundanz absichern. Zu nennen sind die Redundanzarten:

- Materialredundanz
- Funktionsredundanz
- Kontrollen von Handlungen, Selbst - und Fremdkontrolle (Checklisten, Vier-Augen-Prinzip usw.)
- Prüfungen / Abnahmen / Lizenzen usw.

→ Fazit
Es lassen sich verschiedene Arten von Redundanz unterscheiden. Bei einer Materialredundanz werden tatsächlich materielle Bauteile zur gegenseitigen Absicherung parallel geschaltet. Bei einer Funktionsredundanz wird die Funktion abgesichert, z.B. das doppelte Sichern eines Karabinerverschlusses. Aber auch auf der Seite des menschlichen Handelns kann redundant gearbeitet werden. Darunter zählen unterschiedliche Arten von Kontrollen menschlichen Handelns. Das Vier-Augen-Prinzip ist ein praktisches Beispiel dafür. Es können sogar geeignete Selbstkontrollmechanismen sein. Abnahmen und Prüfungen (TÜV, Lizenzen usw.) stellen eine Art Redundanz über den Zeitraum bis zur nächsten Abnahme dar.

Redundanzarten und Versagensbereiche

Aus den obigen Überlegungen ließe sich eine Matrix erstellen, die eine Übersicht für ein umfassendes Sicherheitsmanagement bieten könnte. Um die einzelnen Felder der Matrix in der Praxis mit Leben zu erfüllen, bedarf es einer intensiven Diskussion unter den Anwendern und Anbietern.
Standards sind wichtig, können aber häufig nur Teilbereiche abdecken und werden in der Regel nicht allen Besonderheiten gerecht, die in der Praxis auftreten. So gestalten sich sinnvolle Standards für eine Zweimann-Firma vollkommen anders als solche für einen Anbieter, der mit einer Vielzahl von Trainern u.U. noch aus unterschiedlichen Ländern arbeitet.
Auch wenn wirtschaftliche Interessen oder Ängste und Vorbehalte mancher dagegen sprechen, ein Austausch und die Diskussion in der Fachwelt im Sinne der Sicherheit ist wünschenswert und notwendig. Angefangen bei der Sammlung und dem Austausch von Beinahe-Unfällen und Unfällen, bis hin zur kritischen und selbstreflektierenden Auseinandersetzung mit unseren Handlungen als Trainer. Dass der Zugang zur Thematik komplex ist, hat der Argumentationsstrang dieses Artikels versucht aufzuzeigen.

Der Autor besitzt bereits eine beachtliche Sammlung an Berichten und Schilderungen über Unfälle bzw. Beinahe-Unfälle aus dem Bereich der Erlebnispädagogik und bei Outdoor-Trainings. Um diese Datenbank zu erweitern und zu aktualisieren werden LeserInnen, die entsprechende Erfahrungen gemacht haben, gebeten sich zu melden. Vor allem die Bereiche Seilaktionen und Klettern, Aktionen um und am Wasser, Höhlenbegehungen sowie Interaktions- und Initiativübungen sind interessant. Die Ergebnisse dieser Informationssammlung sollen ausgewertet und veröffentlicht werden und stellen zweifelsohne einen wertvollen Beitrag im Bereich des Risikomanagements dar.
infos bei klaus.kunigham@t-online.de.

Fotos: Kuningham, Plattner ■