4 Wirkprinzipien

Basierend auf Anforderungen und Funktionen stellt die Entwicklung von Wirkmodellen den nächsten Schritt in der Produktkonkretisierung dar. Wirkmodelle beschreiben die prinzipiellen Lösungen einer technischen Problemlösung auf Wirkebene. Durch die Vorsilbe „Wirk“ wird dabei ausgedrückt, dass die für die Funktionserfüllung relevanten Aspekte einer Lösung abgebildet sind. Während ein Funktionsmodell das Produkt noch lösungsneutral beschreibt, adressiert ein Wirkmodell die grundsätzliche Realisierung der Produktfunktionen und ist somit lösungsspezifisch. Wirkprinzipien beziehen sich dabei auf Lösungsmöglichkeiten für Teilfunktionen des Produktes. Einzelne Wirkprinzipien werden im weiteren Verlauf der Entwicklung in Wirkstrukturen beziehungsweise Wirkkonzepten zu Gesamtlösungen verknüpft.

Durch die Darstellung von Lösungen auf Wirkebene können Fixierungen auf bestehende konkrete Gestaltausprägungen vermieden werden, was die Chance auf Innovationen eröffnet. Jedoch ist die Erstellung von Wirkmodellen auch durch eine Reihe von Herausforderungen gekennzeichnet. Beispielsweise wird hier vom Produktentwickler ein gewisses Abstraktionsvermögen verlangt, da nur die wesentlichen funktionsrelevanten Aspekte einer Lösung abgebildet werden und alle anderen Details ausgeblendet bleiben.

Methoden zur Ermittlung von Wirkprinzipien unterstützen den Entwickler dabei, sich bei Bedarf von der konkreten Problemstellung zu lösen und auf abstrahierter Ebene vielversprechende prinzipielle Lösungsideen zu ermitteln. Dies geschieht häufig unter Einbezug externer Informationen aus dafür geeignet aufbereiteten Sammlungen, beispielsweise Konstruktionskatalogen oder Sammlungen physikalischer Effekte. Auch die Integration von Informationen und Wissen aus anderen Disziplinen, zum Beispiel der Biologie, können dem Entwickler dabei helfen, über die Bildung von Assoziationen zu neuen prinzipiellen Lösungsansätzen zu gelangen.

Ein Wirkmodell stellt auch ein Mittel zur Kommunikation zwischen Experten aus unterschiedlichen Disziplinen dar, insbesondere bei der Entwicklung mechatronischer Produkte. Hier werden die Weichen dafür gestellt, wie die lösungsneutralen Funktionen im Produkt realisiert werden beziehungsweise ob eine bestimmte Funktion auf mechanische, elektronische oder softwaretechnische Weise, oder in kombinierter Form umgesetzt wird. Je nach Disziplin geschieht die Beschreibung von prinzipiellen Lösungen in einer anderen „Sprache“ oder Darstellungsform. Wichtig ist jedoch, dass disziplinenübergreifend im Entwicklungsteam ein gemeinsames Verständnis aufgebaut wird.

J. Ponn, U. Lindemann, *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte,*
DOI 10.1007/978-3-642-20580-4_4, © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011

4.1 Ermittlung von Wirkprinzipien für eine Schaltkupplung

Am Beispiel einer Schaltkupplung, die im Antrieb einer Kühlmittelpumpe im Kraftfahrzeug eingesetzt wird, werden die Bedeutung der Suche nach prinzipiellen Lösungsmöglichkeiten für eine technische Problemstellung, aber auch die Herausforderungen bei der Ermittlung von Wirkprinzipien erläutert. Im betrachteten Kühlsystem des Fahrzeuges erfolgt der Antrieb der Kühlmittelpumpe direkt vom Motor über einen Riementrieb. Das Drehmoment für das Pumpenrad wird mithilfe einer Magnetkupplung berührungslos in den Kühlkreislauf übertragen. Dadurch ist das Risiko eines Dichtungsschadens an der Kühlmittelpumpe minimal.

Aufgabe des beschriebenen Entwicklungsprojektes war die Integration einer zusätzlichen Schaltfunktion in das Kühlsystem [Wulf 2002]. Hierdurch sollte eine Verbesserung des Abgasverhaltens des Motors in der Warmlaufphase erzielt werden. Damit der Motor schnell die aus Emissionsgründen günstige Betriebstemperatur erreicht, sollte während der ersten Betriebsminuten kein Kühlmittelumlauf erfolgen. Anforderungen an die Entwicklung waren die Beibehaltung des Prinzips der berührungslosen Drehmomentübertragung zum Pumpenrad sowie ein gleichbleibender Bauraum für den Pumpenantrieb.

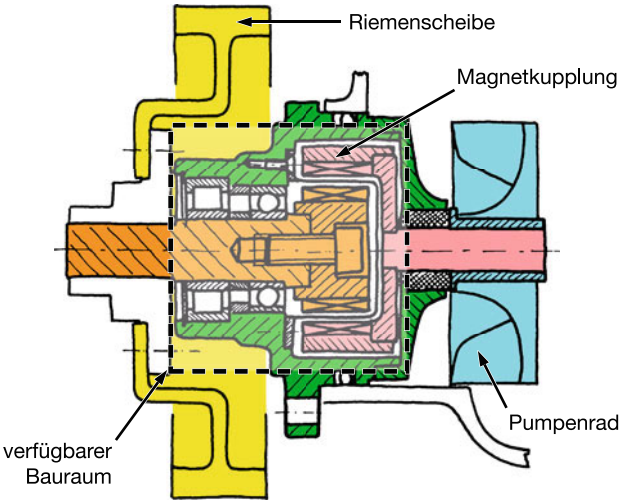


Abb. 4-1. Kühlsystem im Kraftfahrzeug und verfügbarer Bauraum für die Integration der Schaltkupplung [Wulf 2002]

Zu Projektbeginn startete das Entwicklungsteam mit der Klärung der Aufgabe und der Erstellung einer Anforderungsliste. Außerdem wurde eine Recherche hinsichtlich existierender Kupplungsbauformen durchgeführt. Der Fokus lag hierbei auf elektromagnetisch ansteuerbaren **Wirkprinzipien**. Als erstes Fazit ergab sich in dieser Phase des Entwicklungsprozesses, dass handelsübliche Kupplungen kaum in der Lage sind, das geforderte Drehmoment im zur Verfügung stehenden Bauraum zu übertragen.

Bei der im Anschluss durchgeführten Funktionsbetrachtung erkannte das Team, dass es grundsätzlich zwei verschiedene funktionelle Lösungsmöglichkeiten gab. Der erste Ansatz, basierend auf einer **Funktionsdifferenzierung,** würde die Platzierung einer eigenständigen Schaltkupplung zwischen Riemenscheibe und Magnetkupplung bedeuten. Der zweite Ansatz wäre mittels **Funktionsintegration** über die Integration der Schaltfunktion in die Magnetkupplung zu realisieren.

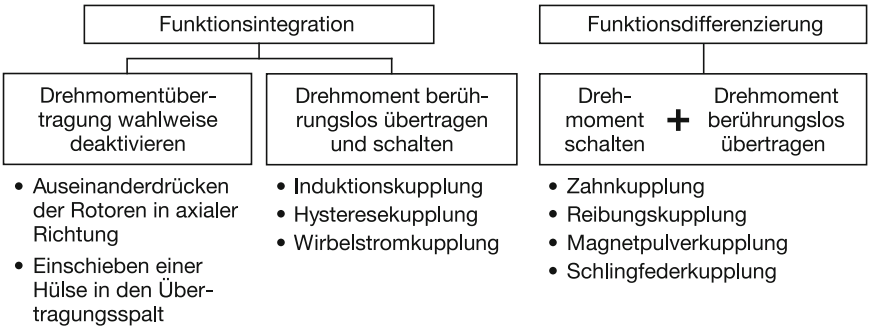


Abb. 4-2. Übersicht über prinzipielle Lösungsmöglichkeiten

Der Ansatz der Funktionsintegration erschien wegen der zu berücksichtigenden Bauraumrestriktionen zunächst attraktiver. Für die Realisierung der Funktionsintegration gab es wiederum zwei unterschiedliche Lösungsansätze auf funktioneller Ebene: zum einen eine wahlweise Deaktivierung der Dauermagnete in der Kupplung, zum anderen eine berührungslose Drehmomentübertragung, bei der das Schalten von Natur aus möglich ist.

Für den ersten Ansatz, die wahlweise Deaktivierung der Dauermagnete in der Kupplung, wäre eine Unterbrechung der Flusslinien zwischen Innen- und Außenrotor erforderlich. Hierfür müssten beide Rotoren in axialer Richtung auseinandergedrückt oder eine Hülse aus einem Material mit hoher magnetischer Permeabilität in den Übertragungsspalt eingeschoben werden. Es wurden Versuche beim Industriepartner durchgeführt, bei denen das Abreißen der magnetischen Kraftübertragung dadurch herbeigeführt wurde, dass der abtriebsseitige Kupplungsteil festgehalten und anschließend wieder losgelassen wurde. Das Ergebnis war, dass der abtriebsseitige Kupplungsteil nicht wieder selbstständig anlief, sondern in ein unkontrolliertes Rattern verfiel. Erst nach dem Abstoppen des Antriebsstranges arbeitete er wieder wie vorgesehen. Daher wurden diese Lösungsansätze nicht weiterverfolgt.

Im nächsten Schritt suchte das Team nach einem Prinzip zur berührungslosen Drehmomentübertragung, das gleichzeitig ein Schalten des Drehmomentflusses erlaubt. Eine Recherche führte zu folgenden Kupplungsprinzipien: Hysteresekupplung, Wirbelstromkupplung und Induktionskupplung. Theoretisch wäre noch eine elektrostatische Anziehung beziehungsweise Abstoßung als Wirkprinzip denkbar gewesen. Aufgrund der im Vergleich zu den anderen Prinzipien geringen erzeugbaren Kräfte wurde dieses Prinzip jedoch nicht betrachtet. Die recherchierten Kupplungsprinzipien wurden sodann auf ihre Eignung hin untersucht. Die Hyste-

rese- und Wirbelstromkupplungen sind grundsätzlich mit Schlupf behaftet. Daher ist die Verlustleistung prinzipbedingt höher als bei einer Induktionskupplung. Eine möglichst geringe Verlustleistung war jedoch ein wichtiges Auswahlkriterium. Daher wurde im weiteren Prozess ein Fokus auf das Prinzip der Induktionskupplung gelegt.

Um konkretere Aussagen zur Eignung des Prinzips der Induktionskupplung machen zu können, wurde ein Grobentwurf für eine Kühlmittelpumpe mit Käfigläufersynchronkupplung erstellt. Die Induktionskupplung entspricht im geometrischen Aufbau weitgehend der Magnetkupplung, die ursprüngliche Konstruktion musste hinsichtlich ihrer Struktur daher kaum verändert werden. Ein Vergleich des Grobentwurfs mit käuflichen Käfigläufersynchronkupplungen führte zu der Erkenntnis, dass herkömmliche Synchronkupplungen nur ungefähr 60 Prozent des geforderten Drehmoments übertragen können, jedoch ein sehr viel größeres Bauvolumen beanspruchen. Daher musste auch hier das Fazit gezogen werden, dass das Wirkprinzip der Induktionskupplung in diesem Falle nicht realisierbar war.

Das Team befand sich somit in der Situation, dass alle verfolgten Lösungsansätze in Richtung einer Funktionsintegration zu keinem brauchbaren Wirkprinzip geführt hatten. Daher wurde die Aufgabenstellung umformuliert und im weiteren Verlauf des Entwicklungsprozesses nach Lösungen gesucht, die auf dem Prinzip der Trennung von Schaltfunktion und berührloser Drehmomentübertragung auf das Pumpenrad beruhten. Hierbei war allerdings zu berücksichtigen, dass in der bisherigen Konstruktion der Bauraum vollkommen ausgeschöpft war. Daher wurde folgende **Problemformulierung** 🗐 aufgestellt: „Wie kann zusätzlicher Bauraum für die Integration einer Schaltkupplung geschaffen werden?“

Als Lösungsideen kam den Entwicklern in den Sinn, durch eine kompaktere Gestaltung der Magnetkupplung Platz zu schaffen oder durch die Umordnung und Umgestaltung der übrigen Bauteile zusätzlichen Bauraum zwischen Antriebs- und Abtriebsstrang zu gewinnen. Die Erstellung von Gestaltalternativen führte jedoch zu der Erkenntnis, dass die vorhandene Lösung der Magnetkupplung bereits die kompakteste Bauform darstellte.

Es wurde daher eine Recherche nach alternativen Kupplungsprinzipien durchgeführt. Deren Bewertung ergab, dass bei einer formschlüssigen Kupplung (Zahnkupplung) keine Schaltung großer Drehzahldifferenzen möglich ist. Bei einer klassischen Reibungskupplung oder einer Magnetpulverkupplung sind die Betätigungskräfte so groß, dass sie im zur Verfügung stehenden Bauraum nicht von einem Elektromagneten aufgebracht werden können. Auch eine Schlingfederkupplung schied als Lösungsalternative aus. Letztlich konnte das Problem nicht durch die einfache Anpassung eines bestehenden Wirkprinzips gelöst werden.

Die Reflexion des bisherigen Prozesses führte zu zwei Erkenntnissen. Zum einen benötigten alle grundsätzlich verwendbaren Kupplungsprinzipien zu große Kräfte, um sie unter den gegebenen räumlichen Einschränkungen elektromagnetisch betätigen zu können. Zum anderen stand im Antriebsstrang quasi „unbegrenzt“ viel Energie für den Schaltvorgang zur Verfügung. Aus diesen beiden Gedanken heraus formulierte das Entwicklungsteam als neue Zielsetzung: „Wie könnte eine Kupplung arbeiten, die den Großteil ihrer Schaltenergie aus dem An-

triebsstrang selbst entnimmt?“. Hierbei entstand die Assoziation mit einem Freilauf im Fahrrad: bei der Rotation in eine Richtung erzeugt der Freilauf die zur Übertragung des Drehmoments notwendigen Kräfte unmittelbar aus dem Antriebsmoment, bei der Rotation in die entgegen gesetzte Richtung ist jedoch die Verbindung zwischen Antriebs- und Abtriebsstrang aufgehoben.

Die Recherche nach Funktionsprinzipien und Bauformen von Freiläufen führte zu dem Prinzip der Eintouren-Rollenkupplung. Hierbei wird die kinetische Energie des Antriebsstrangs dazu genutzt, Rollen aus den Keilspalten eines Freilaufs herauszubewegen. Das Prinzip ist jedoch nur für relativ langsam rotierende Systeme geeignet. Da der Abtriebsstrang aber beim Schalten sehr abrupt abgestoppt werden muss, stellten sich die zu überwindenden Drehzahldifferenzen bei der Kühlmittelpumpe als viel zu groß heraus. Somit war das Prinzip der Eintouren-Rollenkupplung in dieser Form nicht für die Lösung des Problems geeignet.

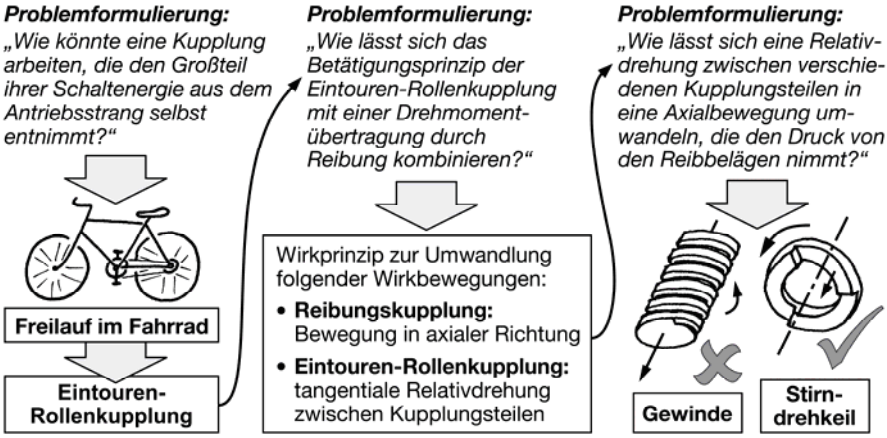
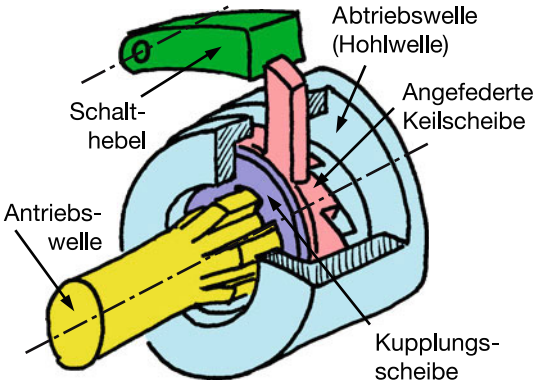


Abb. 4-3. Prozess der Lösungsfindung [nach Wulf 2002]

Aufgrund der enormen Drehzahldifferenz zwischen An- und Abtriebsstrang schien Gleitreibung als einziges Prinzip zur Drehmomentübertragung möglich. Die Schaltkräfte für die Kupplung mussten jedoch hauptsächlich aus dem Antriebsstrang entnommen werden, um eine elektromagnetische Betätigung des Systems zu ermöglichen, wofür sich wiederum das Prinzip der Eintouren-Rollenkupplung anbot. Daher suchte das Team nach einer Möglichkeit, um das Betätigungsprinzip der Eintouren-Rollenkupplung mit einer Drehmomentübertragung durch Reibung zu kombinieren. Für die Übersetzung der tangentialen Relativdrehung zwischen den Elementen der Eintouren-Rollenkupplung in die axiale Wirkbewegung, die für die Funktionsweise der Reibungskupplung erforderlich ist, wurde das Wirkprinzip des Stirndrehkeils ausgewählt.

Schließlich wurden alle Wirkprinzipien in einem **Lösungskonzept** für eine federbetätigte Reibungskupplung vereint, die sich mithilfe von Massenkräften der Abtriebswelle lüften lässt. Im Grundzustand verbindet die Kupplung die Antriebs- und Abtriebswelle drehmomentschlüssig. Die dafür erforderliche Anpresskraft

wird durch eine tangentiale Anfederung einer Keilscheibe gegen die Abtriebswelle realisiert. Zum Lösen der Kupplung wird diese von außen festgehalten. Aufgrund der Massenträgheit bewegt sich die Abtriebswelle gegen die Anfederung der Keilscheibe in Antriebsrichtung weiter. Hierdurch ergibt sich eine Verschiebung des Stirndrehkeils derart, dass ein Kupplungsspalt entsteht, in dem sich die Kupplungsscheibe frei drehen kann. Für eine Wiederherstellung der Drehmomentübertragung ist die Blockade der Keilscheibe zu lösen. Durch die tangentiale Anfederung kehrt sie in die Grundposition zurück, der Reibkontakt zwischen Antriebs- und Abtriebsstrang wird wieder hergestellt. Das Abstoppen und Freigeben der Keilscheibe kann über einen elektromagnetisch betätigten Schalthebel erfolgen.



Funktion	Wirkprinzip
Drehmoment wahlweise übertragen	Reibungs-kupplung
Kupplung betätigen	Eintouren-Rollen-kupplung
Bewegung übersetzen	Stirndrehkeil

Abb. 4-4. Konzept der trägheitsgeschalteten Reibungskupplung [Wulf 2002]

Durch die Erarbeitung einer groben **Gestaltlösung** auf Basis des beschriebenen Wirkkonzeptes konnte nachgewiesen werden, dass die Integration des Kupplungskonzeptes in den zur Verfügung stehenden Bauraum möglich ist. Darüber hinaus wurden die für eine zuverlässige Funktion der Kupplung kritischen Fragestellungen identifiziert und einer Überprüfung mittels **Berechnung** unterzogen. So wurde der Verdrehwinkel der Hohlwelle gegenüber der Keilscheibe beim Auskuppeln mit der minimal auftretenden Drehzahl berechnet und es zeigte sich, dass es auch in diesem Fall zu einem zuverlässigen Lüften der Kupplungsscheibe kommt.

Dieses Beispiel demonstriert, dass es oftmals erforderlich ist, sich gedanklich von der existierenden Gestaltausprägung eines technischen Systems loszulösen, um auf neue innovative Lösungen zu kommen. Die Betrachtung des **Lösungsraums** auf der Wirkebene ermöglicht es, dass Denkblockaden aufgelöst und Vorfixierungen der Entwickler auf konkrete Gestaltlösungen aufgeweicht werden. Im hier beschriebenen Beispiel wurde die Entwicklung einer anforderungsgerechten Lösung dadurch begünstigt, dass eine Vielzahl physikalischer Wirkprinzipien herangezogen wurde. Viele der untersuchten Lösungswege führten bei einer kritischen Analyse in eine Sackgasse, der Schlüssel zum Erfolg lag letztlich in der geschickten Kombination mehrerer Wirkprinzipien. Auf der Wirkebene lassen sich in der Regel auch Zielkonflikte besser erkennen und beheben, da der Fokus der Betrachtung auf die wesentlichen, die funktionsrelevanten Aspekte gelegt wird.

4.2 Methoden zur Ermittlung von Wirkprinzipien

Zur Erfüllung der Anforderungen und Realisierung der Funktionen eines zu entwickelnden Produktes werden im Rahmen der Produktkonkretisierung Lösungsansätze auf Wirkebene erarbeitet.

Ein **Wirkmodell** beschreibt die prinzipielle Lösungsmöglichkeit für eine technische Aufgabenstellung. Die Vorsilbe „Wirk“ drückt dabei aus, dass es sich um funktionsrelevante Aspekte handelt [Ehrlenspiel 2009]. Als **Wirkprinzip** werden die für die Erfüllung einer Funktion erforderlichen physikalischen Effekte in Kombination mit den geometrischen und stofflichen Merkmalen, die das Prinzip der Lösung sichtbar werden lassen, bezeichnet [Pahl et al. 2005]. Die Verknüpfung mehrerer Wirkprinzipien führt zur **Wirkstruktur** einer Lösung. Ein **Wirkkonzept** stellt ein Produktkonzept auf Wirkebene dar. Es umfasst die einzelnen Wirkprinzipien und deren Verknüpfung in der Wirkstruktur.

Die **Wirkgeometrie** als Teil eines Wirkmodells umfasst die Flächen und Körper sowie deren geometrische und kinematischen Beziehungen untereinander, die für die Funktion beziehungsweise den Systemzweck relevant sind. Zur Wirkgeometrie gehören unter anderem **Wirkflächen**, Wirkräume und Wirkbewegungen [Rodenacker 1991]. Wirkflächen sind in der Regel nicht isoliert zu betrachten, da sie immer mit anderen Wirkflächen in Interaktion stehen. **Wirkflächenpaare** werden aus genau zwei Wirkflächen gebildet, die zeitweise, ganz oder teilweise in Kontakt stehen und zwischen denen eine Übertragung von Stoff, Energie und Informationen stattfindet. Die Verbindung zwischen einzelnen Wirkflächenpaaren, die eine dauernde oder zeitweise Leitung von Stoff, Energie und Information ermöglicht, wird auch als **Leitstützstruktur** bezeichnet [Matthiesen 2002].

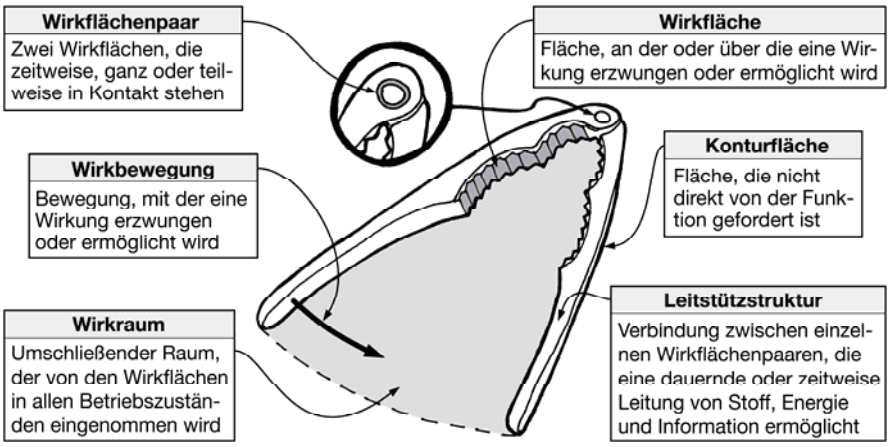


Abb. 4-5. Aspekte der Wirkgeometrie am Beispiel eines Handnussknackers

Die Generierung von Wirkmodellen als Teilschritt in der gesamten Produktkonkretisierung stellt einen Problemlösungsprozess dar. Die Ermittlung geeigneter Wirkprinzipien und Wirkstrukturen wird dabei oftmals durch gewisse Barrieren behindert, die typisch für menschliche Denk- und Handlungsvorgänge sind. Zu diesen Barrieren gehören unter anderem das Denken in alten Lösungsmustern, die Angst vor Fehlern und auch die Zufriedenheit mit dem Bekannten.

Um systematisch zu neuen Lösungsideen zu gelangen und die vorhandenen gedanklichen Barrieren zu überwinden, ist zunächst eine Abstraktion der konkreten Problemstellung erforderlich. Ergebnis ist ein **Problemmodell**, das heißt eine verfremdete oder abstrahierte Beschreibung der Problemstellung. Auf dieser Ebene können nun **Lösungsideen** ermittelt werden, die daraufhin wieder in den ursprünglich betrachteten Bereich zu übertragen sind, um eine Lösung für das eigentliche Problem zu erzeugen. Dieses allgemeine Vorgehen zur Lösung technischer Problemstellungen ist auf Wirkebene anwendbar. Der zugrunde liegende Mechanismus zur Übertragung des Problems in einen anderen Bereich findet sich in zahlreichen Methoden beziehungsweise Methodenkombinationen wieder.

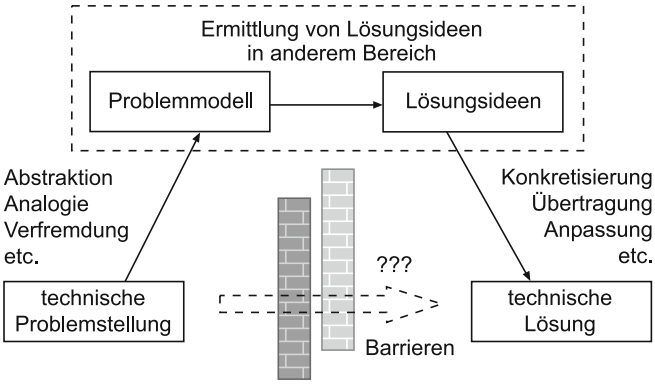


Abb. 4-6. Vorgehen bei der Lösung technischer Problemstellungen [Lindemann 2009]

Die **Wirkebene** ist im **Münchener Produktkonkretisierungsmodell** zwischen der abstrakteren Funktionsebene und der konkreteren Bauebene angeordnet. Ausgangspunkt für die Ermittlung von Wirkprinzipien können Anforderungsmodelle, Funktionsmodelle oder Baumodelle sein. Mit einer Betrachtung des Produktes auf Wirkebene lassen sich dabei unterschiedliche Zwecke verfolgen, beispielsweise die Erhöhung des Problem- und Systemverständnisses, die Schaffung einer Übersicht über den Lösungsraum oder die Ermittlung neuer Lösungsideen.

Ist die Funktionsebene der Ausgangspunkt, stellt die Generierung von Wirkprinzipien einen Schritt der Konkretisierung dar. Methodisch lässt sich dieses Vorgehen unter anderem dadurch unterstützen, indem die Zusammenhänge in einem Funktionsmodell formalisiert beziehungsweise klassifiziert werden. Durch Einbeziehen von Informationsspeichern oder Lösungskatalogen lassen sich prinzipielle Lösungsmuster zuordnen, die ihrerseits wiederum auf die konkrete Problemstellung zu übertragen sind. So können Funktionen beispielsweise mittels phy-

sikalischer Größen beschrieben werden. Dies ermöglicht es, über die Betrachtung physikalischer Effekte zu neuen Wirkprinzipien zu gelangen. Die Funktionsbetrachtung kann ebenso dabei unterstützen, Wissen aus anderen Disziplinen, zum Beispiel aus der Biologie, in die Lösungssuche zu integrieren, um durch die Bildung von Assoziationen auf Basis biologischer Phänomene prinzipielle Lösungsideen zu generieren.

Ein weiterer denkbarer Ausgangspunkt für die Synthese von Wirkprinzipien sind Zielkonflikte oder technische Widersprüche, die sich aus Anforderungen oder Funktionsmodellen ableiten lassen. Indem die Problemstellung als Widerspruch zwischen Systemparametern formuliert wird, lassen sich allgemeine Lösungsprinzipien zur Überwindung des technischen Widerspruches identifizieren und zuordnen, die ihrerseits zu neuen Lösungsideen führen.

Ausgangspunkt der Betrachtung können auch bestehende Lösungen sein. Eine Abstraktion konkreter Produktmodelle auf der Bauebene unterstützt den Vergleich verschiedener Lösungen und die Identifikation der zugrunde liegenden Wirkprinzipien. Konkrete Produktdarstellungen beinhalten in der Regel Informationen zur Gestalt der Bauteile und der Baustruktur. Die Herausforderung hierbei ist es zu erkennen, welche Funktionen vom Produkt erfüllt und wie diese prinzipiell realisiert werden. Unterstützend kann hierbei das Denken in Wirkflächenpaaren und Leitstützstrukturen sein.

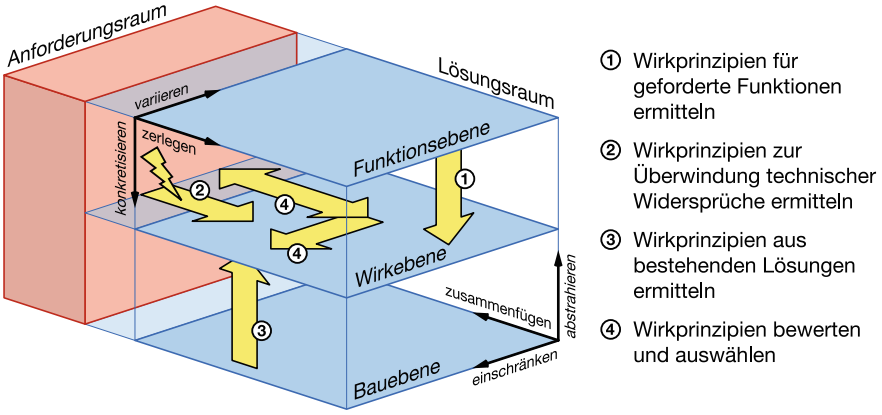


Abb. 4-7. Einordnung in das Münchener Produktkonkretisierungsmodell (MKM)

Die Darstellung von Wirkprinzipien erfolgt häufig in Form von **Prinzipskizzen** oder Schemazeichnungen, welche auch für andere Beteiligte im Prozess die grundsätzliche Art und Weise erkennen lassen, wie die Produktfunktionen realisiert werden. Mithilfe von Prinzipskizzen lassen sich sowohl Geometrien als auch Kräfte und kinematische Verhältnisse darstellen. Skizzen können schematisch-abstrakte, visuell-grafische oder textuelle Informationen enthalten [Pache 2005, Müller 2006]. Um prinzipielle Lösungen zu speichern, zu kommunizieren und im Bedarfsfall auch wieder verwenden zu können, bedarf es einer geeigneten Form der Dokumentation. Trotz der zunehmenden Virtualisierung der Produktentwick-

lung (CAD, Computer Aided Engineering, Virtual Reality und so weiter) spielen auch in der heutigen Zeit für die Darstellung von ersten Lösungsideen Handskizzen eine große Rolle. Um den Aufwand bei der Darstellung von Lösungsprinzipien gering zu halten, existiert für oft verwendete Lösungselemente (zum Beispiel Schrauben, Lager und Ventile) ein schematisches Vokabular. Dieses ist spezifisch ausgeprägt, je nachdem aus welcher Disziplin ein Lösungselement stammt (beispielsweise Mechanik, Pneumatik, Hydraulik oder Elektrotechnik).

Funktion	Physikalischer Effekt	Wirkprinzip
Drehmoment übertragen	Reibungseffekt $F_R = \mu \cdot F_N$	H7/r6
Handkraft vergrößern	Hebeleffekt $F_a \cdot a = F_b \cdot b$	a b

Abb. 4-8. Prinzipskizzen zur Darstellung von Wirkprinzipien [Pahl et al. 2005]

Eine Lösungssuche auf Wirkebene, unterstützt durch systematische und/oder intuitive Methoden, führt oftmals zur Generierung einer großen Zahl an Lösungsideen. Bevor eine weitere Konkretisierung erfolgt, ist daher eine Bewertung und Auswahl von Wirkprinzipien erforderlich. Dieser Prozess muss sich an den Rahmenbedingungen des Entwicklungsprozesses orientieren. Die Bewertung hat unterschiedlich zu erfolgen, je nachdem, ob explizit neuartige Lösungen mit Innovationspotenzial gefordert sind, oder aber ob es darum geht, in möglichst kurzer Zeit eine anforderungsgerechte Lösung zu entwickeln und umzusetzen. Auf Basis der ausgewählten Wirkprinzipien ist es dann möglich, alternative Gesamtkonzepte für das zu entwickelnde Produkt zu erstellen.

4.2.1 Wie lassen sich Wirkprinzipien für geforderte Funktionen ermitteln?

Die Erstellung von Funktionsmodellen unterstützt den Entwickler bei der Durchdringung der Problemstellung und hilft dabei, das Systemverständnis zu erhöhen. Die in diesem Prozess erarbeiteten Funktionen stellen wiederum einen Ausgangspunkt für die Lösungssuche auf Wirkebene dar, das heißt für die Ermittlung von Wirkprinzipien zur Realisierung der Funktionen im Produkt.

Viele technische Probleme sind physikalischer Natur. Die meisten technischen Produkte funktionieren nach physikalischen Grundprinzipien, sie sind angewandte Physik. Deshalb ist es für Ingenieure unerlässlich, mit dem physikalischen Ursache-Wirkungs-Denken vertraut zu sein und die Eigenschaften und Anwendungs-

möglichkeiten der physikalischen Effekte zu kennen [Ehrlenspiel 2009]. Wirklich neue Maschinen und Geräte entstehen häufig durch neuartige Anwendungen der Physik. Tintenstrahldrucker mit piezoelektrischen Druckköpfen, die Common-Rail-Einspritzung bei Verbrennungsmotoren, Navigationssysteme für Flugzeuge und Fahrzeuge, elektromechanische Bremsen im Automobil [Bertram 2002] und die Blu-Ray Disc als optisches Speichermedium in der Unterhaltungselektronikbranche sind Beispiele dafür.

In der Praxis beschränken sich viele Ingenieure oft auf den Einsatz weniger physikalischer Prinzipien, die sie aufgrund ihrer Spezialisierung kennen und beherrschen. So denken Mechanikspezialisten zum Beispiel in mechanischen Lösungen und Hydraulikspezialisten bevorzugen hydraulische Lösungen. Auch ganze Unternehmen sind oft auf bestimmte Technologien fixiert. Das hat aufgrund der gesammelten Erfahrung bezüglich dieser Technologien viele Vorteile, bringt durch die träge Reaktion auf technische Entwicklungen aber auch Nachteile mit sich. Dies resultierte zum Beispiel in Umstellungsschwierigkeiten der mechanischen Uhrenindustrie im Massenmarkt auf die Elektronik [Ehrlenspiel 2009].

Die Betrachtung physikalischer Effekte bei der Lösungssuche bietet verschiedene Chancen. Zum einen können bisher traditionell produzierte Produkte wieder innovativ werden, wenn die zugrunde liegende Physik besser verstanden und optimiert wird. Zum anderen kann die Lösungssuche mit physikalischen Effekten bei vielen konstruktiven Aufgaben neue Sichtweisen eröffnen, Denkblockaden auflösen und damit die Generierung neuartiger **Lösungsideen** unterstützen.

Physikalische Effekte sind elementare physikalische Erscheinungen, die als Gesetzmäßigkeiten formuliert werden können, wodurch sich physikalisches Geschehen voraussehbar beschreiben lässt. Die Beschreibung physikalischer Effekte erfolgt zumeist durch relevante physikalische Größen, die in einen formelmäßigen Zusammenhang gebracht werden können, sowie durch eine Skizze der Anordnung. Hilfreich ist die Angabe von Anwendungsbeispielen, die verdeutlichen, wie die abstrakten Effekte in konkreten Produkten umgesetzt werden. Ein Hebel ist beispielsweise ein „starrer, um eine Achse drehbar gelagerter Körper mit ein- oder zweiseitigem Hebelarm“. Dieser Effekt wird unter anderem für Kraftübersetzungen und zum Wandeln von Kräften in Drehmomente (und umgekehrt) eingesetzt, wie es beispielsweise bei Drehmomentenschlüsseln der Fall ist.

Im Folgenden wird das Vorgehen bei der **Lösungssuche mit physikalischen Effekten** 🗐 beschrieben. Diese Methode ist gut anwendbar bei Problemen, die durch den Umsatz von Stoff, Energie und Information beschrieben werden können. Zur Veranschaulichung wird hierfür die Problemstellung „Heben einer Last“ betrachtet. Zunächst sind die zu realisierenden Funktionen zu bestimmen. Diese können beispielsweise aus einem **Umsatzorientierten Funktionsmodell** 🗐 stammen. Eine Teilfunktion lautet „Handkraft vergrößern“. Um die Suche nach geeigneten physikalischen Effekten zu erleichtern, ist die Funktion mittels relevanter physikalischer Eingangs- und Ausgangsgrößen zu beschreiben. In diesem Fall ist die Kraft F_1 die Eingangsgröße, die Kraft F_2 die Ausgangsgröße, wobei F_2 größer als F_1 ist. Im nächsten Schritt sind geeignete physikalische Effekte zur Realisierung der Funktion zu identifizieren. Es werden somit Effekte gesucht, die die

Änderung einer Kraft als Eingangsgröße in eine größere Kraft als Ausgangsgröße ermöglichen. Ein in Frage kommender Effekt zur Erfüllung dieser Funktion ist unter anderem die „Druckfortpflanzung“. Die Kraftübersetzung entspricht in diesem Fall dem Verhältnis der beiden Kolbenflächen. Durch die Anwendung des Effektes auf die konkrete Problemstellung lässt sich als Wirkprinzip und damit als prinzipielle Lösungsmöglichkeit eine hydraulische Hebebühne skizzieren.

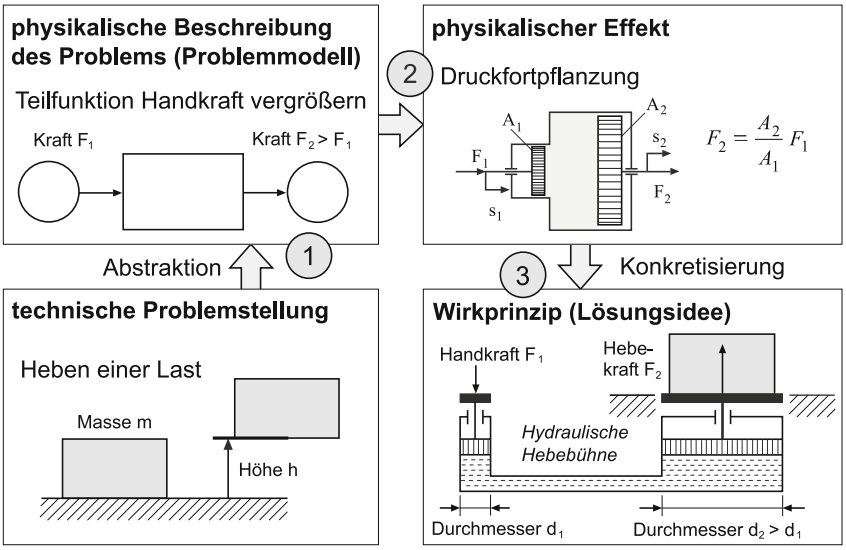


Abb. 4-9. Vorgehen bei der Lösungssuche mit physikalischen Effekten

Als Hilfsmittel für die Identifikation alternativer Lösungen auf Wirkebene finden Kataloge beziehungsweise **Sammlungen physikalischer Effekte** 🗐 [Koller et al. 1994, Ehrlenspiel 2009] Anwendung. Diese stellen unterschiedliche Effekte in strukturierter Form bereit. Digitale Kataloge, beispielsweise in Form von webbasierten Datenbanken, bieten dabei verschiedene Vorteile gegenüber herkömmlichen papierbasierten Effektkatalogen. Es besteht unter anderem die Möglichkeit einer schnellen Suche nach relevanten Effekten über Suchmasken und Schlagworteingaben. Außerdem ist eine Vernetzung der Inhalte möglich, zum Beispiel als Hyperlinks zu Funktionen, verwandten Effekten und Anwendungsbeispielen [Gaag 2010].

Der systematische Zugriff auf geeignete physikalische Effekte kann über eine **Funktionsgrößenmatrix** [VDI 2222] erfolgen. Bei dieser sind in den Zeilen mögliche physikalische Eingangsgrößen und in den Spalten mögliche physikalische Ausgangsgrößen aufgetragen. Die Zellen der Matrix enthalten jeweils in Frage kommende Effekte oder die Nummern der Effekte im Katalog. In der Regel lässt sich für die Realisierung einer Funktion eine Vielzahl an physikalischen Effekten ermitteln, die prinzipiell in Frage kommen. Für das Beispiel der Kraftübersetzung sind neben der „Druckfortpflanzung“ unter anderem auch die physikalischen Effekte „Hebel“, „Keil“, „Kniehebel“ oder „Flaschenzug“ denkbar.

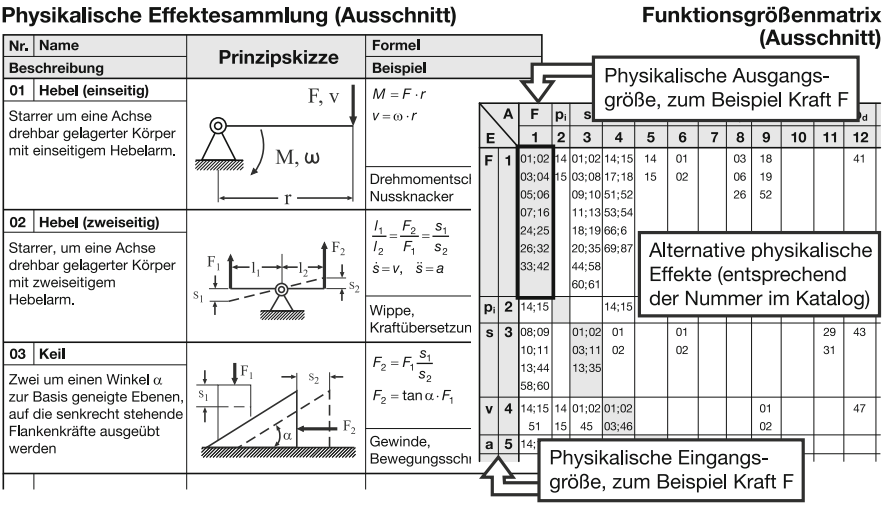


Abb. 4-10. Sammlung physikalischer Effekte und Funktionsgrößenmatrix

In ähnlicher Weise wie physikalische Effekte können für Maschinen auch chemische oder biologische Effekte eingesetzt werden. Beispiele sind Vorgänge bei der Verbrennung oder der „Lotuseffekt“. Die Integration von Wissen aus anderen Disziplinen bietet in bestimmten Fällen ein hohes Potenzial zur Entwicklung innovativer Lösungen. In diesem Kontext hat sich der Begriff **Bionik** etabliert, ein durch die Verknüpfung von Biologie und Technik entstandenes Kunstwort [Gramann 2004, Hill 1997]. Im Englischen ist in diesem Kontext ebenfalls der Begriff „Biomimetics“ gebräuchlich [Bhushan 2009]. Eine konkrete Methode zur Ermittlung von prinzipiellen Lösungsideen mittels der Integration von Wissen aus dem Bereich der Biologie ist die **Lösungssuche auf Basis biologischer Vorbilder** [nach Gramann 2004]. Das Vorgehen bei der Methodenanwendung besteht aus folgenden Handlungsabschnitten: Analyse der Problemstellung, Formulierung des Suchziels, Zuordnung biologischer Systeme, Analyse der zugeordneten Systeme und technische Umsetzung. Die Schritte werden durch drei Entscheidungspunkte erweitert, die Iterationen oder das Verlassen der Sequenz erlauben.

Den Ausgangspunkt bildet die Analyse der technischen Problemstellung, die durch das Aufstellen eines Funktionsmodells unterstützt werden kann. Welche Art von Funktionsmodellierung dabei zu bevorzugen ist, hängt von der Entwicklungssituation und den Präferenzen der Anwender ab. Zentrale Funktionen eines Staubsaugers sind beispielsweise die Ablösung des Schmutzes vom Untergrund durch eine Düse, die Leitung des Luft-Schmutz-Gemisches durch Saugrohr und Saugschlauch, die anschließende Trennung von Schmutz und Luft im Filter sowie die Erzeugung des Luftstroms durch Motor und Gebläse. Als eine verbesserungswürdige Schwachstelle an konventionellen Saugern wurde unter anderem die unzulängliche Schmutzablösung durch die Fadenheber an der Düse identifiziert. Eine weitere Schwachstelle stellt die strömungsungünstige Gestaltung von Düsen, Saugrohren und Saugschläuchen dar.

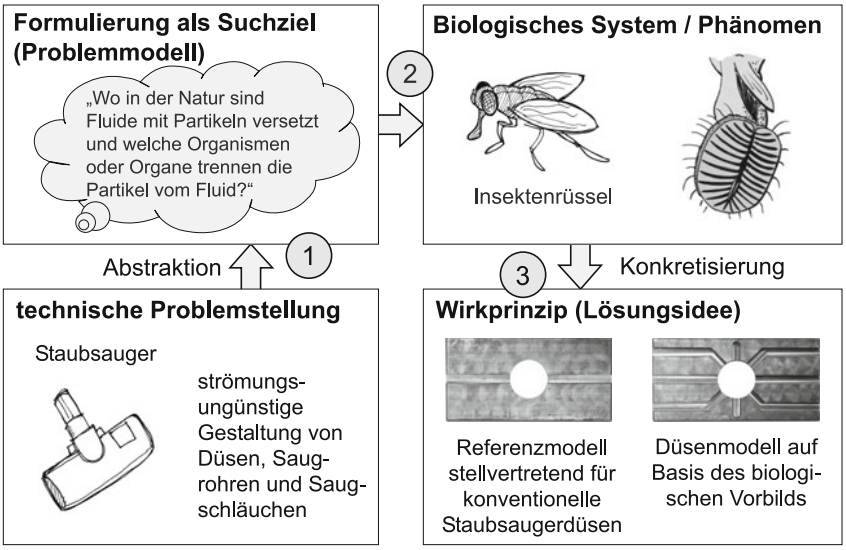


Abb. 4-11. Vorgehen bei der Lösungssuche auf Basis biologischer Vorbilder

Um biologische Systeme zu identifizieren, die vergleichbare Funktionen erfüllen wie die zu verbessernden Funktionen des betrachteten technischen Systems, sind aufbauend auf der Systemanalyse Suchziele zu formulieren. Die Suchziele können im Beispiel des Staubsaugers folgendermaßen lauten: „Welche Organismen existieren, die Partikel von Oberflächen entfernen?“ oder „Wo in der Natur sind Fluide mit Partikeln versetzt und welche Organismen oder Organe trennen die Partikel vom Fluid?“. Bei der Suche nach potenziellen Analogien bieten abstraktere Formulierungen eine höhere Trefferquote.

Mithilfe der formulierten Suchziele kann im nächsten Schritt eine zielgerichtete Suche nach biologischen Systemen beziehungsweise Phänomenen erfolgen. Generell ist die Zuordnung biologischer Systeme nicht zu unterschätzen. Aufgrund des meist nur unzureichenden spezifischen Wissenstandes unter Ingenieuren im Bereich der Biologie besteht hier eine Barriere, die den Zugang zu potenziellen biologischen Vorbildern deutlich erschwert.

Um die Suche nach interessanten biologischen Systemen für den Ingenieur zu erleichtern, existieren Hilfsmittel wie zum Beispiel die **Assoziationsliste** [Gramann 2004]. Diese ermöglicht einen Zugang zu Suchfeldern in biologischer Fachliteratur, basierend auf technischen Funktionen und zugeordneten Stichwörtern. Denkbare Assoziationen im Beispiel des Staubsaugers sind für die Funktion „lose Stoffe heben“ Systeme der Nahrungsaufnahme in der Biologie wie Insektenrüssel, Raspelzungen von Schnecken, klebrige Zungen von Fröschen, Zungen von Katzen zur Fellpflege und einige mehr.

Die gewonnenen Analogien müssen in einem weiteren Schritt einer Analyse unterzogen werden, um die Übertragbarkeit auf die technische Problemstellung beurteilen zu können. Zur Erhöhung des Informationsstandes können ähnlich wie

bei technischen Recherchen Quellen wie das Internet, Experten oder Fachliteratur herangezogen werden. In überschaubaren Fällen kann darüber hinaus eine physikalische Modellbildung und **Berechnung** zielführend sein. Häufig werden derartige Modelle aber so komplex sein, dass es sinnvoll ist, Versuche durchzuführen. **Orientierende Versuche** können hier sehr schnell und unkompliziert zu aussagekräftigen Ergebnissen führen.

Operation	Objekt / Feld / Parameter	Assoziationen (biologisch)
heben	lose Stoffe	Extremitäten zum Graben (Maulwurf (Talpa europaea), Maulwurfsgrille (Gryllotalpa gryllotalpa), Zungen, Mundwerkzeuge der Insekten (Insecta), Schweinerüssel (Suidae), Krallen
heben	Feststoffe	Hände, Schnäbel, Mäuler
bewegen	Gas	Atmung (je nach Klasse sehr unterschiedlich), Bombardierkäfer (Brachynus), Termitenbau (Isoptera), Bau des Präriehundes (Cynomys ludovicianus)
bewegen	Flüssigkeiten	Cilien-/Flagellenschlag, Peristaltik, Spucken, Blutgefäße (optimal verzweigtes Röhrentransportsystem), Bewegung des Zellplasmas (Plasmaströmung des Actomyosin-Systems)

Abb. 4-12. Ausschnitt aus der Assoziationsliste [Gramann 2004]

Den letzten Schritt stellt die technische Umsetzung dar, also die Übertragung der biologischen Phänomene auf das eigentliche technische Problem. In der Regel werden sich biologische Vorbilder nicht direkt in technische Lösungen umsetzen lassen. Für die Umsetzung muss das biologische Vorbild in der Regel abstrahiert werden. Dabei sind diejenigen **Merkmale** (Geometrie, Werkstoff und so weiter) zu identifizieren, die im Produkt einen entscheidenden Vorteil bringen. Im Falle der Staubsaugerdüse ist dies beispielsweise der Übergang von einem zentralen Kanal auf mehrere Kanäle auf der Düsenunterseite. Dies stellt auch eine Anwendung des Gestaltungsprinzips der **Kaskadierung** dar.

Im Rahmen der Suche nach Wirkprinzipien zur Realisierung geforderter Funktionen sind zahlreiche Quellen aus verschiedenen Disziplinen (Physik, Chemie oder Biologie) nutzbar. Die Qualität der darin enthaltenen Informationen hängt ganz entscheidend vom Abstraktionsgrad ihrer Darstellung ab. Sind Informationen zu konkret, können sie zu Fixierungen führen, sind sie zu abstrakt, kann der Informationsgehalt zu gering sein.

4.2.2 Wie lassen sich Wirkprinzipien zur Überwindung technischer Widersprüche ermitteln?

Im Rahmen der Aufgabenklärung wird eine Vielzahl von Anforderungen ermittelt, von denen sich in der Regel etliche negativ beeinflussen, was zu **Zielkonflikten** führt. Ein typischer Zielkonflikt bei der Entwicklung eines Automobils ist die An-

forderung nach einer hohen Leistung einerseits und einem geringen Kraftstoffverbrauch andererseits. Zielkonflikte stellen Entwickler vor große Herausforderungen, bieten aber auch Potenziale für Innovationen. Sie basieren unter anderem auf **technischen Widersprüchen**, die den Umstand beschreiben, dass die Verbesserung eines Parameters eines technischen Systems gleichzeitig die Verschlechterung eines anderen Parameters des gleichen Systems bewirkt. In physikalischen Widersprüchen sind Zielkonflikte aufs Äußerste zugespitzt und erscheinen daher zunächst meist unlösbar. Ein **physikalischer Widerspruch** entspricht der Anforderung, dass ein Produktparameter gleichzeitig unterschiedliche Zustände einnehmen soll, also dass ein Produkt zum Beispiel sowohl heiß als auch kalt sein soll (Produktparameter Temperatur).

Auf der Grundlage von Patentanalysen hat der russische Ingenieur G. Altschuller seine Methodik des erfinderischen Problemlösens entwickelt, die das Ziel verfolgt, technische Erfindungen systematisch hervorzubringen. Diese Methodensammlung ist unter dem Kürzel **TRIZ** (Teorija Reschenija Izobretatel'skich Zadač) [Altschuller 1984, Terninko et al. 1997] als innovationsorientierte Methodik populär geworden. Ein wesentliches Element der Methodik sind Ansätze zur Überwindung von Widersprüchen. Wurde ein Widerspruch ermittelt, existieren im Wesentlichen zwei Strategien zur Lösungsfindung: eine Kompromissfindung, bei der lediglich Gestaltparameter optimiert werden, oder die Auflösung des Widerspruches, die durch die Änderung des **Wirkkonzeptes** geschieht. Die TRIZ-Methodik verfolgt letzteren Ansatz.

Zur Auflösung eines Widerspruches können alternative **technische Effekte** herangezogen werden. Technisch nutzbare Effekte sind in unterschiedlichen Bereichen zu finden (unter anderem in der Physik, Biologie, Chemie und Mathematik). Für eine effiziente Suche können geeignete Informationsquellen verwendet werden, beispielsweise **Sammlungen physikalischer Effekte** 🗐.

Zur Auflösung physikalischer Widersprüche bietet sich die Anwendung von **Prinzipien der Separation** [Herb 2000] an. Es werden vier Prinzipien unterschieden: die Separation im Raum, in der Zeit, innerhalb eines Objektes und seiner Teile sowie die Separation durch Bedingungswechsel. Grundgedanke der Separation in der Zeit ist es beispielsweise, sich widersprechende Erfordernisse zeitlich zu trennen. Die Umsetzung des Prinzips lässt sich anhand der Wirkungsweise von Sesselliften erläutern. Diese sollen sich zum einen schnell bewegen, damit die Fahrzeit kurz ist, zum anderen aber langsam fahren, um den Passagieren ein sicheres und bequemes Einsteigen zu ermöglichen. Die Lösung ist es, für das Ein- und Aussteigen den Sessel vom schnell laufenden Seil abzukoppeln, damit er sich in dieser Zeitspanne sehr langsam bewegen kann.

Die **Widerspruchsorientierte Lösungssuche** 🗐 dient der Überwindung technischer Widersprüche. Die einzelnen Schritte in der Anwendung der Methode werden am Beispiel eines Regenschirms erläutert. Ein Regenschirm soll im geöffneten Zustand möglichst groß sein, um Schutz vor Regen zu bieten. Im geschlossenen Zustand hat er dahingegen möglichst klein und handlich zu sein, um beispielsweise in einem Rucksack transportiert werden zu können.

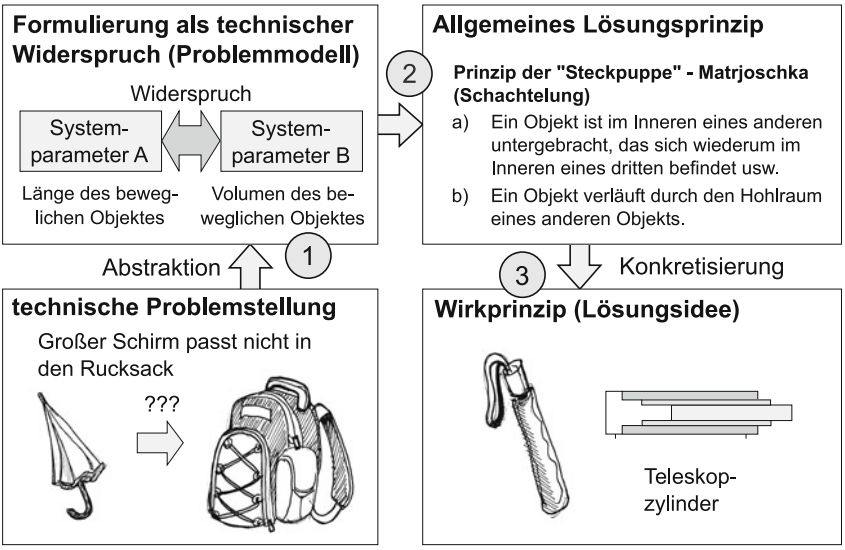


Abb. 4-13. Vorgehen bei der Widerspruchsorientierten Lösungssuche

Zunächst ist der technische Widerspruch im Rahmen der Aufgabenklärung oder Funktionsanalyse zu formulieren. Als Ausgangspunkt für die Identifikation technischer Widersprüche im betrachteten System bietet sich die **Relationsorientierte Funktionsmodellierung** 🗐 an. Aus dem Funktionsmodell heraus lassen sich formal **Problemformulierungen** 🗐 ableiten. Die sich widersprechenden Merkmale des Systems sind sodann den von Altschuller vorgegebenen technischen Parametern zuzuordnen. Beim Regenschirm sind das beispielsweise die Parameter „Länge des beweglichen Objektes“ und „Volumen des beweglichen Objektes“, die im Widerspruch stehen. Für die Zuordnung der Parameter gibt es in der Regel mehrere Möglichkeiten, die alternativ oder ergänzend verfolgt werden sollten.

Im nächsten Schritt können auf Basis der identifizierten Zweierkombinationen von technischen Parametern relevante **Prinzipien zur Überwindung technischer Widersprüche** 🗐 [Altschuller 1984] ausgewählt werden. Als Hilfsmittel zur zielgerichteten Auswahl aus der Gesamtmenge von vierzig Prinzipien steht die so genannte **Widerspruchsmatrix** zur Verfügung. Die Auswahl der Parameter „Länge des beweglichen Objektes“ und „Volumen des beweglichen Objektes“ führt zu vier Prinzipien, unter anderem zum Prinzip Nummer sieben, der „Steckpuppe“ (Matrojschka). Dieses besagt, dass ein Objekt im Inneren eines anderen unterzubringen ist beziehungsweise ein Objekt durch den Hohlraum eines anderen Objektes verlaufen soll. Sollte dieses Vorgehen nicht zum Erfolg führen, können die Prinzipien auch einzeln auf ihre Anwendbarkeit geprüft werden.

Schließlich sind die Lösungsprinzipien auf das eigentliche Problem anzuwenden. Im Falle des Regenschirms ist eine mögliche Lösung (angeregt durch das Prinzip der Steckpuppe), den Stiel als Teleskopzylinder auszuführen, wodurch er sich für den Transport im Rucksack verkürzen lässt. Die Lösungsprinzipien sind

sehr abstrakt formuliert. Dadurch eröffnet sich auf der einen Seite eine Vielzahl an konkreten Lösungsmöglichkeiten, die sich daraus ableiten lassen. Auf der anderen Seite ist für eine erfolgreiche Lösungssuche eine gewisse Erfahrung im Umgang mit den Prinzipien notwendig.

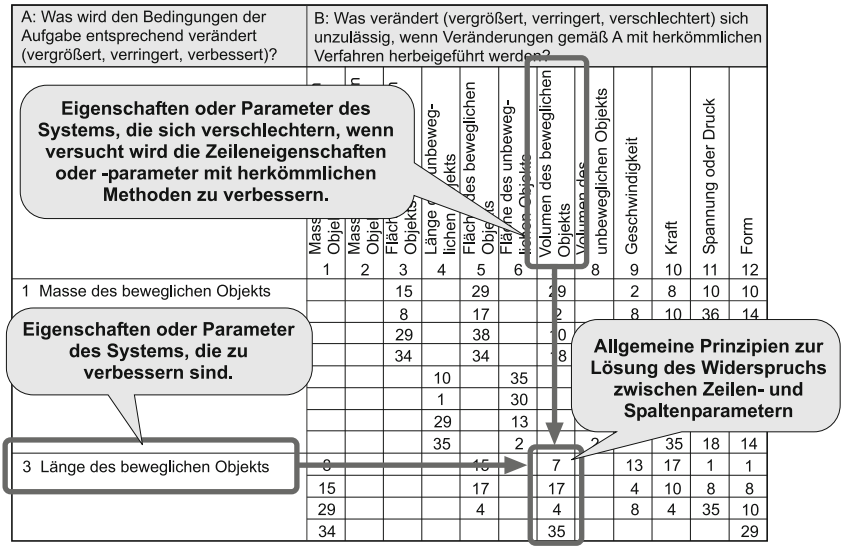


Abb. 4-14. Auswahl von allgemeinen Lösungsprinzipien mithilfe der Widerspruchsmatrix

Durch die Identifikation und Auflösung von technischen Widersprüchen können technische Systeme verbessert und Potenziale für Innovationen geschaffen werden. Hierbei ist aber auch zu berücksichtigen, dass Widersprüche meist nicht rein technischer Natur sind, sondern aus einer Kombination von technischen, sozialen und wirtschaftlichen Faktoren bestehen.

4.2.3 Wie lassen sich Wirkprinzipien aus bestehenden Lösungen ermitteln?

Oft haben es Entwickler bereits in frühen Phasen des Entwicklungsprozesses mit konkreten bestehenden Lösungen zu tun, die als Input für die Entwicklung dienen. Dies können beispielsweise Vorgängermodelle, Konkurrenzprodukte oder Patente sein. Diese bestehenden Lösungen können in unterschiedlicher Form vorliegen, zum Beispiel als CAD-Modell, als Fertigungszeichnung oder als Hardware. Um die in diesen Modellen enthaltenen Informationen optimal in den Entwicklungsprozess einbringen zu können, vor allem in den ersten Phasen der Lösungsfindung, ist es erforderlich, die vorliegenden konkreten Modelle auf die wesentlichen Zusammenhänge, das heißt die Wirkprinzipien, zu reduzieren.

Zunächst sind relevante bestehende Lösungen zu identifizieren. Geeignete Quellen für eine Recherche sind unter anderem Patentdatenbanken, Herstellerkataloge, Fachmagazine und Fachmessen. Eine gezielte Suche zur Filterung relevanter Lösungen ist beispielsweise mittels geeigneter Merkmale über Suchmasken in Patentdatenbanken möglich. Leider wird eine anwendungs- und funktionsorientierte Suche nach bestehenden Lösungen bisher nur in geringem Maße unterstützt. Ein Ansatz in dieser Richtung ist die Entwicklung einer firmenübergreifenden, allgemein anerkannten, anwendungsorientierten Klassifikation von Unternehmensangeboten [Gaag 2010].

Wurden geeignete Systeme identifiziert, sind diese zu analysieren, um die für die eigene Entwicklung relevanten Zusammenhänge zu ermitteln. Zunächst ist eine geeignete **Systemgrenze** für die Analyse zu definieren. Hierfür sind diejenigen Stellen im System zu identifizieren, die für die Aufgabenstellung Relevanz besitzen. Falls es um die gezielte Behebung von **Schwachstellen** geht, kann die Systemgrenze zunächst recht eng um die Orte im System gezogen werden, an denen die Schwachstellen sichtbar werden. Dies können Bauteilpaarungen sein, an denen unerwünscht hoher Verschleiß oder ein Bauteilversagen auftritt. Im Rahmen der Analyse kann die Systemgrenze dann gezielt erweitert werden, um die Ursachen für das Problem zu erforschen. Umgekehrt kann es sinnvoll sein, zunächst eine weite Systemgrenze zu wählen, um diese schrittweise einzugrenzen. Eine gezielte **Systemgrenzenverschiebung** [Ehrlenspiel 2009], das heißt eine Ausdehnung wie auch eine Verengung der Systemgrenzen, kann vor allem dann hilfreich sein, wenn es darum geht, ein Problem klarer zu erkennen oder einen ins Stocken geratenen Lösungsprozess wieder zu aktivieren.

Der nächste Schritt ist die Zerlegung des Systems. Hier existieren zwei Sichtweisen: die geometrische Zerlegung und die zeitliche Zerlegung. Bei der geometrischen Zerlegung sind innerhalb der Systemgrenze relevante **Wirkflächen** beziehungsweise **Wirkflächenpaare** [Rodenacker 1991] und **Leitstützstrukturen** [Matthiesen 2002] zu identifizieren. Hierfür ist ein geeigneter Startpunkt zu wählen. Bei der Analyse konkreter Schwachstellen in existierenden Systemen bieten sich beispielsweise diejenigen Stellen als Ausgangspunkt der Modellierung an, an denen das Systemversagen auftritt. Ein schrittweiser Ausbau des Modells kann sich unter anderem an Funktionspfaden orientieren, also an Stoff-, Energie- und Informationsumsätzen. Schließlich stellt sich die Frage, welches der geeignete Detaillierungsgrad der Modellierung ist. Grundsätzlich bietet sich zunächst eine grobe Systemmodellierung an. Können die relevanten Phänomene damit nicht erklärt werden, ist der Detaillierungsgrad der Modellierung schrittweise zu erhöhen („Hineinzoomen“).

Bei der zeitlichen Zerlegung sind relevante **Systemzustände** und **Sequenzen** zu unterscheiden. Diese spielen beispielsweise bei der Analyse des Anwendungsprozesses des Produktes eine Rolle. Je nach Systemzustand sind unterschiedliche Wirkflächenpaare relevant und **Funktionen** des Systems wirksam. Auch Fehlfunktionen oder Schwachstellen im System können gewissen Systemzuständen oder Sequenzen dieser Zustände zugeordnet werden. Diese Sichtweise ist vor allem bei dynamischen Systemen erforderlich, um diese besser zu durchdringen.

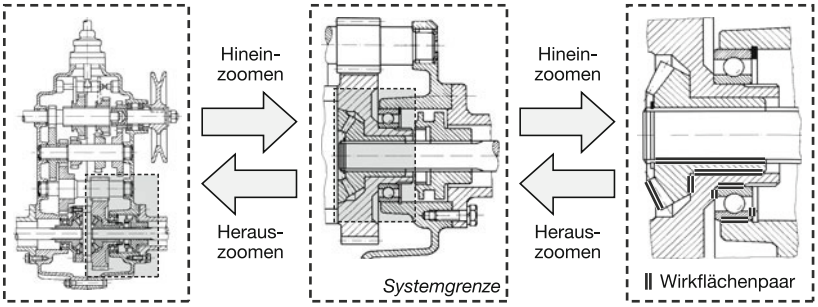


Abb. 4-15. Geometrische Zerlegung, Systemgrenzenverschiebung [nach Ehrlenspiel 2009]

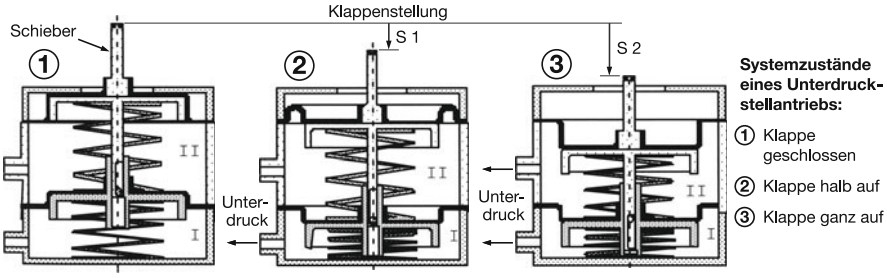


Abb. 4-16. Zeitliche Zerlegung: Systemzustände und Sequenzen [nach Ehrlenspiel 2009]

Die Festlegung der Systemgrenze, die Betrachtung von Wirkflächen wie auch von Zuständen haben wechselseitige Beziehungen. Am Beispiel einer klassischen Fruchtpresse mit manueller Press- und Drehbewegung wird dies deutlich. Wird die Systemgrenze eng um das Gerät gelegt, dann ist die Wirkfläche, die in der Anwendung gegen die Wirkfläche der Frucht wirkt, nur als singuläre Wirkfläche enthalten. Wird die Systemgrenze dagegen weiter gefasst, indem die Hand eines Bedieners eingeschlossen wird, so muss das Wirkflächenpaar Gerät-Frucht mit seinen Anforderungen und Eigenschaften betrachtet werden. Werden verschiedene Systemzustände analysiert, so ist zum Beispiel das Aufsetzen der Frucht, der eigentliche Entsaftungsvorgang wie auch das Abnehmen der ausgepressten Frucht differenziert zu betrachten, da hier jeweils unterschiedliche geometrische, kräftemäßige und andere Bedingungen sowie Wechselwirkungen zu beachten sind.

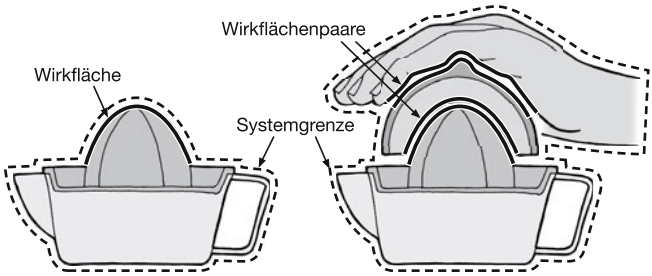


Abb. 4-17. Wirkflächen, Wirkflächenpaare und Systemgrenzen am Beispiel einer Fruchtpresse

Daraus resultiert die Notwendigkeit, im Entwicklungsprozess die Systemgrenzen sinnvoll zu verschieben und gleichermaßen die möglichen Zustände eines Systems zu betrachten, um die daraus resultierenden Erkenntnisse in Wirkstrukturen zu realisieren und geeignete Schlussfolgerungen zu ziehen.

Werden bestehende Systeme und Lösungen auf diese Weise abstrahiert und analysiert, um die zugrunde liegenden Wirkmechanismen zu identifizieren und zu verstehen, ist eine geeignete Darstellung dieser Zusammenhänge erforderlich. Für die abstrahierte Darstellung technischer Zusammenhänge werden häufig schematische, symbolhafte Beschreibungselemente genutzt. Beispielsweise werden Wälzlager abstrahiert als Rechteck mit einem Kreuz oder Federn als Zick-Zack-Linie dargestellt. Um die bereichsübergreifende Kommunikation dieser Zusammenhänge zu fördern, bietet es sich ferner an, für häufig verwendete Beschreibungselemente Standards zu etablieren. Dabei ist zu beachten, dass je nach Fachdisziplin unterschiedliche Darstellungsformen verwendet werden beziehungsweise für unterschiedliche Zusammenhänge in verschiedenen Disziplinen gleiche Darstellungsformen existieren. Bei der Betrachtung mechanischer Zusammenhänge lassen sich Wirkflächenpaare durch zwei parallele Striche symbolisieren, in der Elektrotechnik wiederum werden auf diese Weise Kondensatoren dargestellt.

Bei der Analyse konkreter Systeme und Lösungen und der Ermittlung der zugrundeliegenden Wirkprinzipien ist die jeweilige Zielsetzung im Projekt und die Entwicklungssituation zu berücksichtigen.Je nachdem ob der Fokus der Betrachtung auf der Behebung konkreter Schwachstellen oder der Analyse der allgemeinen Funktionalität liegt ist ein unterschiedliches Vorgehen erforderlich. Die Systemgrenze ist nicht statisch, sondern ist ziel- und problemorientiert zu erweitern oder zu verengen. Gleiches gilt für den Detaillierungsgrad des betrachteten Systems innerhalb der Systemgrenze.

4.2.4 Wie lassen sich Wirkprinzipien bewerten und auswählen?

Nach einer Sammlung von Wirkprinzipien und prinzipiellen Lösungsideen für eine technische Problemstellung ist es meist erforderlich, eine Bewertung durchzuführen und eine Auswahl zu treffen. Hierbei ist ein situativ angepasstes Vorgehen zielführend. Ist das vorrangige Ziel im Projekt zum Beispiel die möglichst schnelle Entwicklung einer technisch umsetzbaren Lösung, sind unbrauchbare Prinzipien auszusortieren, um sich auf diejenigen zu konzentrieren, die eine zeitnahe Realisierungschance besitzen. Hat allerdings die Erarbeitung einer neuartigen innovativen Lösung Priorität vor der Einhaltung eines engen Terminplans, ist darauf zu achten, dass nicht voreilig vermeintlich schwache Effekte verworfen werden. Vergleicht man **physikalische Effekte** hinsichtlich ihrer technischen Realisierbarkeit, kann man teilweise sehr große Unterschiede feststellen. Gerade neue Technologien werden häufig mit Skepsis bedacht. In Bewertungsprozessen haben diese dann unter Umständen Nachteile gegenüber konventionellen, bewährten Lösungsprinzipien und Effekten.

Konstruktionskataloge [Roth 1994b] enthalten in der Regel einen Zugriffsteil, der charakteristische Eigenschaften von Effekten auflistet. Diese ermöglichen einen Vergleich von Effekten und können daher als Kriterien für die Bewertung und Auswahl herangezogen werden. Mögliche Kriterien beziehungsweise Eigenschaften sind die Größe der erzeugbaren Kräfte, die charakteristischen Abmaße oder die Frage, ob eine ständige Energiezufuhr notwendig ist. Die Auswahl eines geeigneten Effektes hat in Abhängigkeit von den Anforderungen an das zu entwickelnde Produkt zu erfolgen. Wichtig für die Auswahl eines passenden Effektes ist außerdem die Betrachtung von Störgrößen, die auftreten können. Beim Reibungseffekt sind beispielsweise Schmierungszustand, Oberflächenrauheit und Temperatur bedeutend, die Auswirkungen auf den Reibwert μ haben können.

Gliederungsteil			Hauptteil			Zugriffsteil					
Kraft-typ	Physikalisches Gesetz	Spezieller Effekt	Gleichung	Anordnungsbeispiel	Nr	Stoffliche Bedingungen für Kraftwirkung	Erzeugende Intensitäts- oder Feldgröße	Ständige Energiezufuhr nötig	Arbeitsvermögen der Kraft, Größe	Größe der erzeugbaren Kräfte	Charakteristische Abmessung
1	2	3	1	2		1	2	3	4	5	6
Schwerekräfte	Gravitationsgesetz $F=\Gamma\cdot\frac{m_1\cdot m}{r^2}$	Erdanziehung	$F=\Gamma\cdot\frac{m_E\cdot m}{r^2}$	m_E, F, m, r	1	zwei Massenträger	Schwerefeld	nein	ja	mittel	
		Gewicht (Erdoberfl.)	$F=m\cdot g$	m, g, F	2						
		Auftrieb	$F=\rho\cdot g\cdot V$	Fluid, ρ, V, F, g	3	Massenträger u. umgebendes Fluid					
Trägheitskräfte	Newtonsches Gesetz $\vec{F}=\frac{d(\vec{m}\vec{v})}{dt}$	Bahnbeschleunigung	$F=m\cdot a$	m, F, v, a	4	träger Festkörper oder Fluid	Geschwindigkeit	ja (Reibung)	unmittelbar nur an Körpern des Relativsystems	groß	
		Zentrifugalkraft	$F=m\cdot\omega^2\cdot r$	ω, m, r, F	5						
		Corioliskraft	$F=2m\omega v_r$	ω, m, v_r, F	6						
		Strahlkraft Staudruck	$F=\dot{m}\cdot v(1-\cos\alpha)$ α Ablenkwinkel	$\dot{m}$, v, α, F	7	Festkörper und Fluid	Massenstrom (Geschwindigkeit)	ja	ja		
		Rückstoßprinzip	$F=\dot{m}v_r$	$\dot{m}$, v_r, F	8					sehr groß	
		Konvektive Beschleunigung	$F=A_1\cdot p\cdot\frac{v^2}{2}\left[\left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2-1\right]$	A_1, v, A_2, F	9					groß	$\sqrt[4]{A_1 A_2 A}$

Mögliche Kriterien:
- Effektstärke (zum Beispiel Größe der erzeugbaren Kräfte)
- Effektart (zum Beispiel mechanisch, elektrisch, thermodynamisch)
- Bekanntheitsgrad des Effektes
- ...

Abb. 4-18. Eigenschaften physikalischer Effekte im Konstruktionskatalog [Roth 1994b]

Physikalische Effekte können erheblich in ihrer Effektstärke variieren. Die Auswahl eines geeigneten Effektes unter technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten muss dies berücksichtigen. Als Beispiel wird die Funktion „Kraft erzeugen“ betrachtet. Mit dem Effekt „Druckkraft“ lassen sich beispielsweise gegenüber dem Effekt „elektrostatische Anziehung“ größere Kräfte erzielen, wenn die Anordnung in etwa dieselben geometrischen Abmessungen annehmen darf. Um dieselbe Kraft zu erzeugen, ist mit dem elektrostatischen Prinzip bei bestimmten Parametern ein siebzehnmal größerer Durchmesser vonnöten gegenüber einer hydrostatischen Lösung.

Es zeigt sich allerdings, dass ein voreiliges Verwerfen vermeintlich „schwacher“ Effekte in manchen Fällen zu einer Lösungseinschränkung führt, die Innovationen verhindern kann. Beispielsweise existieren erfolgreiche Produktlösungen am Markt, die den Effekt der „elektrostatischen Anziehung“ zur Befestigung eines Whiteboards an der Wand nutzen: eine stark elektrostatische Folie hält sogar auf Raufasertapete. Außerdem mochte es vor einiger Zeit noch unmöglich erscheinen,

einen tonnenschweren Zug mittels Magneten zum Schweben zu bringen. Doch auch hier hat die Entwicklung des Transrapids gezeigt, dass sich der Effekt der „magnetischen Anziehung beziehungsweise Abstoßung“ sehr wohl zur Anhebung, Führung und Beschleunigung eines Zugs nutzen lassen kann.

Gesucht:
Physikalischer Effekt, mit dem eine Gegenkraft von 100N erzeugt werden kann.

Lösung:
Mögliche Effekte (unter anderem):
- Druckkraft
- Elektrostatische Anziehung

Bewertung:
Vergleich der benötigten Durchmesser:

$$\frac{\text{elektrostatisch}}{\text{hydrostatisch}} \rightarrow \frac{d_e}{d_h} = \frac{60\ \text{mm}}{3{,}5\ \text{mm}} \approx \frac{17}{1}$$

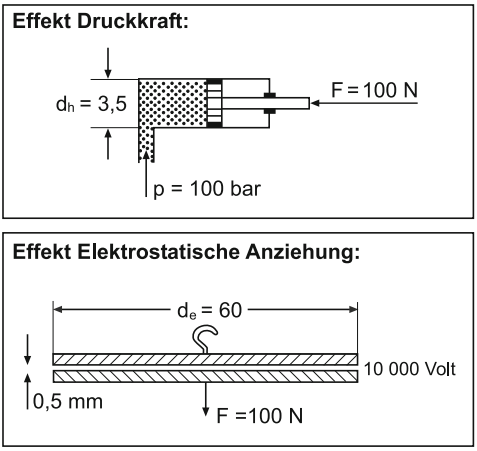


Abb. 4-19. Vergleich der Effektstärke am Beispiel der Funktion „Kraft erzeugen“

Schließlich ist bei der Bewertung und Auswahl von Wirkprinzipien zu beachten, dass Funktionen meist nicht durch einzelne Effekte alleine realisiert werden, sondern durch Kombinationen mehrerer physikalischer Effekte beziehungsweise so genannter Effektketten. Einzelne Wirkprinzipien zur Umsetzung von Teilfunktionen sind außerdem zu **Wirkstrukturen** im Gesamtprodukt zu verknüpfen. Hier sind die jeweils in Frage kommenden Effekte auf Kompatibilität zu prüfen. Nach Möglichkeit sind Effekte gleichen Typs auszuwählen und zu kombinieren, also beispielsweise nur mechanische, hydraulische oder elektrische Effekte. Ein Wechsel der Energieart führt in der Regel zu einer aufwändigeren Konstruktion.

Für die Ermittlung relevanter Eigenschaften von Wirkprinzipien beziehungsweise zur Beurteilung der grundsätzlichen Tauglichkeit von Prinziplösungen bieten sich unter anderem überschlägige **Berechnungen** an. Bei Wirkprinzipien basierend auf physikalischen Effekten sind einfache Auslegungsrechnungen häufig durch die Anwendung physikalischer Gesetzmäßigkeiten möglich. Darüber hinaus können einfache Bewertungsmethoden herangezogen werden, wie eine **Vorauswahl** anhand von Ausschlusskriterien oder ein **Vorteil-Nachteil-Vergleich**.

Als Fazit lässt sich ziehen, dass die Umsetzung neuer physikalischer Wirkprinzipien oft grundlegender konzeptueller Überlegungen und eines erhöhten Aufwands für die Realisierung bedarf. Eine Veränderung der wirkenden Physik ermöglicht aber mitunter einen bedeutenden Technologiesprung.

4.3 Ermittlung von Wirkprinzipien für einen innovativen Nussknacker

Dass Wirkprinzipien genutzt werden können, um auch scheinbar einfache Produkte des alltäglichen Gebrauchs zu verbessern, veranschaulicht das folgende Beispiel. Ziel dieses Projektes war die Entwicklung eines Konzeptes für einen innovativen Handnussknacker [von Saucken 2007]. Dieser sollte sich vor allem durch ein eine geringe Bedienkraft und eine schnelle, intuitive Bedienung auszeichnen. Der Nussknacker sollte darüber hinaus ein neuartiges Design aufweisen, um ihn gegenüber der Vielfalt verfügbarer Modelle zu differenzieren.

Zunächst wurden die Anforderungen an den Nussknacker ermittelt und in einer **Anforderungsliste** dokumentiert. Dabei galt es vor allem, Aspekte in Bezug auf das Öffnen der Nuss sowie die Nuss selbst zu klären. Darunter fallen Anforderungen wie zum Beispiel die erforderliche Kraftaufbringung auf die Schale, die zulässigen Handkräfte sowie ein guter Zugang zum Kern und die Unversehrtheit des Kerns. Darüber hinaus wurden weitere Anforderungen festgelegt, die unter anderem die Gewährleistung der Anwendersicherheit, einen einfachen Zusammenbau durch den Benutzer und Randbedingungen der Fertigung betreffen.

			Zahlenwert							
Nr.	Name	Bezeichnung	min.	exakt	max.	Einheit	Gewichtung	Ursprung	Ersteller	Datum
	Technische Anforderungen									
1	Kraftaufbringung auf Schale	Kraft	350		500	N	9	SA Nr. 2133	v. Saucken	21.12.2005
2	Kern und Schale trennen						1	SA Nr. 2133	v. Saucken	21.12.2005
3	Handkraft	Kraft			80	N	9	Recherche	v. Saucken	21.12.2005
4	Bearbeitungszeit einer Nuss	Zeit			60	s	9	Schätzung	v. Saucken	21.12.2005
5	Aussenmaße	Volumen			2000	cm^3	1	Schätzung	v. Saucken	21.12.2005
6	Guter Zugang zu Kern						9	SA Nr. 2133	v. Saucken	21.12.2005
7	Unversehrtheit des Kerns						9	SA Nr. 2133	v. Saucken	21.12.2005
8	Nussdurchmesser	Durchmesser	3		4	cm	3	Recherche	v. Saucken	02.01.2006
9	Gewicht	Gewicht			2	kg	1	Schätzung	v. Saucken	21.12.2005
10	Anwendersicherheit gewährleistet						3	Checkliste	v. Saucken	21.12.2005
11	Intuitive Bedienung						9	Checkliste	v. Saucken	21.12.2005
12	Neuartigkeit						9	Betreuervorgabe	v. Saucken	21.12.2005
13	Ansprechende Formgestalt						3	Checkliste	v. Saucken	21.12.2005
14	Zusammenbau Benutzer	Teilezahl			3		3	Checkliste	v. Saucken	21.12.2005
15	Wartungsfreiheit						1	Checkliste	v. Saucken	21.12.2005
16	Recyclingfähigkeit	Anzahl Materialien			2		1	Checkliste	v. Saucken	21.12.2005
	Organisatorische Anforderungen									
17	Fertigung in PE-Werkstatt						9	Aufgabenstellung	v. Saucken	
18	Herstellkosten	Kosten			10	Euro	1	Benchmark	v. Saucken	21.12.2005
19	Dauer der Entwicklung	Zeit			10	Wochen	3	Zeitplan	v. Saucken	21.12.2005

Abb. 4-20. Anforderungsliste für einen innovativen Handnussknacker [nach von Saucken 2007]

Anschließend wurden im Rahmen einer umfassenden Recherche bestehende Lösungen identifiziert und analysiert. Dazu wurden für jede einzelne Lösung zunächst die zugrunde liegenden **Wirkprinzipien** ermittelt. Da verschiedene Lösungen auf gleichen oder ähnlichen **physikalischen Effekten** beziehungsweise Effektketten aufbauen, wurden die Lösungen nach Haupteffekten geclustert, zum Beispiel „Keil“, „Hebel“ und „Stoß“. Um für die weitere Produktentwicklung Hinweise hinsichtlich Optimierungsmöglichkeiten zu finden, wurde im Anschluss ein **Vorteil-Nachteil-Vergleich** durchgeführt. Vorteil der Lösungen im Cluster „Keil“ ist unter anderem die gute Kraftverstärkung, ein Nachteil ist die umständliche, langsame Bedienung. Dagegen sind die Nussknacker im Cluster „Stoß“ einfach und schnell zu bedienen. Jedoch ist die Kraft schlecht dosierbar und es besteht eine mögliche Verletzungsgefahr durch starke Zersplitterung von Schale und Kern.

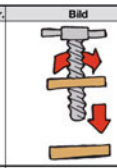
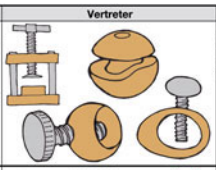
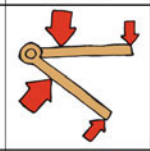
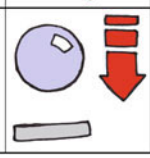
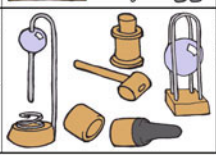
Nr.	Bild	Beschreibung	Vertreter	Vorteil	Nachteil
1		**Lösungsprinzip Keil (Gewinde):** Primäre physikalische Wirkprinzipien: Hebel, Keil und Kohäsion fester Körper. Durch einen Hebel wird ein Drehmoment aufgebracht, welches mit großer Übersetzung in eine lineare Bewegung gewandelt wird und dadurch die Nuss knackt. Die Fixierung der Nuss erfolgt formschlüssig.		Gute Kraftverstärkung. Weg beschränkt nach Knacken der Nuss. Auffangen der Nussteile gut realisierbar.	Aufwendige Wirkstruktur. Zeitintensive Verarbeitung, besonders das für den Prozess uninteressante Zurückschrauben.
2		**Lösungsprinzip Hebel:** Primäre physikalische Wirkprinzipien: Hebel und Kohäsion fester Körper. Handkraft wird durch Hebel erheblich verstärkt und knackt dadurch die Nuss. Diese wird durch Reibschluss bzw. Formschluss fixiert.		Einfache Wirkstruktur. Sicheres Wirkprinzip. Kostengünstige Herstellung.	Zielkonflikt zwischen Verstärkung der Handkraft und Einfachheit der Bedienung. Auffangen der Nussteile schwierig zu gestalten bei Varianten mit zwei symetrischen Hebeln. Weg nach Knacken der Nuss schlecht zu beschränken.
3		**Lösungsprinzip Stoß:** Primäre physikalische Wirkprinzipien: Stoß allgemein, Trägheit und Kohäsion fester Körper. Die Nuss wird durch eine Stoß gesprengt, der unterschiedlich erzeugt wird. Die Nuss wird formschlüssig fixiert.		Einfaches, sicheres Wirkprinzip. Auffangen der Nussteile einfach zu realisieren. Fertigungsaufwand gering.	Schlechte Dosierbarkeit der Kraft, Weg nach Knacken der Nuss schlecht zu beschränken. Evtl. Verletzungsgefahr für Benutzer. Starke Zersplitterung der Schale und des Kerns.

Abb. 4-21. Analyse und Bewertung bestehender Lösungen von Nussknackern

Um weitere Optimierungsmöglichkeiten zu identifizieren, wurde die bisherige Funktionsweise konventioneller Nussknacker in einem **Relationsorientierten Funktionsmodell** dargestellt. Mithilfe dieses Modells wurden Problemformulierungen abgeleitet sowie **technische Widersprüche** ermittelt. So führt zum Beispiel die Kraftaufbringung zum Öffnen der Nussschale, aber gleichzeitig auch zur Beschädigung des Nusskerns oder der Nussschale.

Zur Erarbeitung möglicher Lösungsansätze wurde die Problemstellung formal durch eine Kombination sich widersprechender technischer Parameter nach Altschuller ausgedrückt, zum Beispiel „von außen auf das Objekt wirkende schädliche Faktoren“ und „Spannung oder Druck“. Für die Initiierung der Lösungssuche wurden sodann über die **Widerspruchsmatrix** zugehörige **Prinzipien zur Überwindung technischer Widersprüche** nach Altschuller identifiziert, unter anderem die Prinzipien der „Abtrennung“ und der „Anwendung von Wärmedehnung“. Unabhängig von der Widerspruchsmatrix wurden weitere Prinzipien für die Anregung von Lösungsideen herangezogen, zum Beispiel die Prinzipien der „Ausnutzung mechanischer Schwingungen“ und der „Anwendung dünner Folien“.

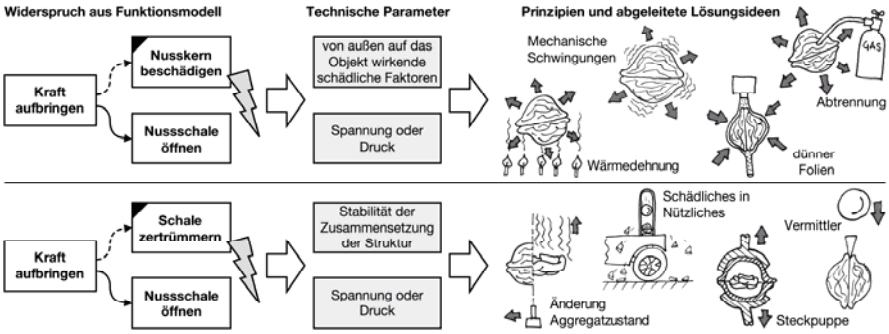


Abb. 4-22. Wirkprinzipien zur Lösung technischer Widersprüche im Nussknacker

Ergänzend zu den beschriebenen Ansätzen wurden unter Einsatz von Kreativtechniken weitere Lösungsideen zur Realisierung der Teilfunktionen des Nussknackers ermittelt. Aus der Vielzahl an Lösungsideen wurden mittels einer **Vorauswahl** diejenigen Ideen ausgeschlossen, deren Realisierungschancen als äußerst gering eingestuft wurden, wie beispielsweise der Einsatz von Säure zur Öffnung der Nusschale oder die Trennung von Schale und Kern mittels Magnetismus. Auf Basis der verbleibenden Ideen konnten jedoch im Laufe des weiteren Entwicklungsprozesses mehrere unterschiedliche innovative Lösungskonzepte erarbeitet werden [von Saucken 2007].

4.4 Zusammenfassung

Die Lösungssuche auf Wirkebene bietet große Potenziale für Innovationen, stellt die Entwickler aber auch vor gewisse Herausforderungen. Kreativitätsbarrieren in dieser Hinsicht sind unter anderem das Denken in eingefahrenen Lösungsmustern, die Angst vor Fehlern oder die Zufriedenheit mit dem Bekannten. Zur Unterstützung der Suche nach geeigneten Wirkprinzipien können physikalische Effekte, allgemein formulierte Prinzipien zur Überwindung technischer Widersprüche oder auch Vorbilder aus der Biologie herangezogen werden. Die bewusst abstrakte Beschreibung der technischen Problemstellung ermöglicht hierbei die Loslösung von bestehenden Denkmustern und bekannten Lösungen.

Die Vielzahl der physikalischen Effekte, von denen Entwickler oftmals nur eine kleine Teilmenge nutzen, erfordert den Einsatz geeigneter Informationssysteme wie Physikbücher, Effektesammlungen oder auch Datenbanken. Viele Innovationen beruhen auf der Nutzung alternativer physikalischer Effekte. Heutzutage müssen aber zunehmend auch chemische, biologische und sonstige Effekte einbezogen werden. Die Suche nach Lösungen in anderen Wissensgebieten stellt für Ingenieure aufgrund der „Sprachbarriere“ mitunter eine Hürde dar. Hier bietet es sich an, die Kommunikation mit Experten aus diesen Disziplinen zu suchen. Außerdem existieren einfache Hilfsmittel für den Einstieg in die Suche nach Analogien aus anderen Disziplinen, zum Beispiel die Assoziationsliste.

Die bewusste Suche von technischen Widersprüchen, zum Beispiel auf Basis einer Funktionsanalyse, ist ein wichtiger Ausgangspunkt für eine mögliche Überwindung dieser Widersprüche und damit die Generierung von innovativen und optimierten neuen Lösungen. Der Weg über die Widerspruchsmatrix nach Altschuller ist nicht immer zwingend zielführend. Geübte Anwender können auch direkt auf geeignete Lösungsprinzipien zurückgreifen.

Die Bewertung und Auswahl von Wirkprinzipien hat sich an den Erfordernissen der Entwicklungssituation zu orientieren. Sind Lösungen gesucht, die sich schnell technisch umsetzen lassen, werden sich vermutlich viele Prinzipien als unbrauchbar erweisen. Sind jedoch echte Innovationen gefragt, ist darauf zu achten, dass vermeintlich schwache Effekte nicht voreilig verworfen werden.

http://www.springer.com/978-3-642-20579-8

Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte
Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltlösungen
Ponn, J.; Lindemann, U.
2011, XIV, 466 S. 509 Abb., 31 Abb. in Farbe., Hardcover
ISBN: 978-3-642-20579-8