

Leonardo – Geometrie der Bewegung

Georg Glaeser, Franz Gruber, Universität für angewandte Kunst Wien

Kurzfassung: Die enorme Universalbegabung des Leonardo da Vinci (1452-1519) ist mittlerweile gut bekannt, nicht zuletzt durch Ausstellungen, die sich seinen verschiedenen Beschäftigungsfeldern widmen. Eine dieser Ausstellungen mit dem Titel *Leonardo: Mensch – Erfinder – Genie*, die 2005 in Wien gezeigt wurde, war Anlass, eine umfangreiche Software zu den Erfindungen Leonardos zu erstellen. Sie erlaubt es, über 40 Exponate interaktiv zu animieren und die Wirkungsweise der Vorstellungen des Meisters nachzuvollziehen.

In dieser Arbeit wird exemplarisch ein Teil der Simulationen beschrieben. Die Software hat zwei Schwerpunkte: Die Geometrie der Bewegung, die dahinter steckt, sowie deren physikalische Wirkungsweise. So nebenbei kann man auch die Originalskizzen des Genies aus der Toskana einblenden, um verifizieren zu können, dass Leonardo sich genau dies gedacht hat.

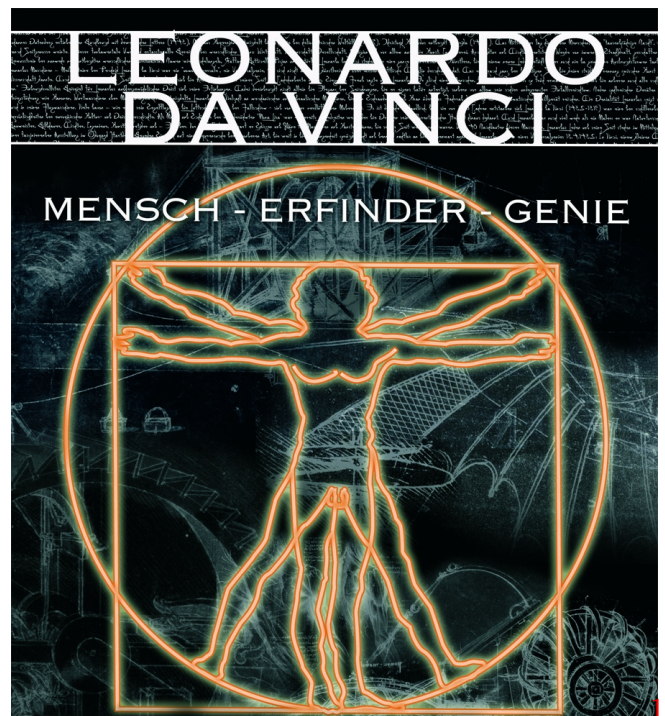
Einleitung

Um sich als Laie die Wirkungsweise einer komplizierten Maschine wahrhaftig vorstellen zu können, bedarf es üblicherweise eines funktionstüchtigen Modells, an das man unter Umständen auch Hand anlegen kann. Nicht selten ist es zu wenig, dass eine autorisierte Person das Modell kurz erklärt bzw. exemplarisch in Gang setzt.

Beim Besuch der Ausstellung im Wiener Schottenhof im April 2005 (das Ausstellungslogo ist in Abb. 1 zu sehen) war es den Autoren trotz fundiertem geometrischen Wissen nicht möglich, gewisse Exponate auf Anhieb in ihrer vollen Funktionsweise zu erfassen. Erst eine genaue Untersuchung der Modelle nebst Studium der Originalskizzen brachte bei einigen Maschinen Licht ins Dunkel – und offenbarte die

unglaubliche Vorstellungskraft des Genies, das seiner Zeit um Jahrhunderte voraus war.

Weil man nun einmal nicht jedem Besucher einer Ausstellung gestatten kann, an jedem Exponat herumzukurkeln, geschweige denn, dieses in seine Bestandteile zu zerlegen, entstand die Idee, dem Besucher die Möglichkeit zu geben, die hier beschriebene interaktive Lehr-Software vor Ort an aufgestellten Computern zu verwenden.



Wegen des großen Erfolgs wurde die Ausstellung bis in den Juli 2005 verlängert, und schon ab Mitte Mai trat das Projekt in einer Minimalversion in eine reale Testphase. Um missbräuchliche Verwendung des Computers zu verhindern, mussten in dieser Version nicht wenige Sicherheitsmaßnahmen implementiert werden: Ein Ausstieg ist nur über Passwort möglich,

das Menü ist ausgeblendet und es gibt keine Hinweise zur Verwendung der Tasten.

Dermaßen erweitert, wandert die Ausstellung mittlerweile um die Welt, bis dato mit den Stationen Berlin, Chicago, Seoul (Südkorea) und Seattle. Um optimale Wirkung zu erzielen, musste die Software so konzipiert sein, dass sie in kürzester Zeit an jede noch so exotische Sprache adaptiert werden kann. So gibt es derzeit bereits eine koreanische Variante (siehe Abb. 63). Sinnvollerweise sollte der Besucher der Ausstellung die Sprache jederzeit problemlos wechseln können.

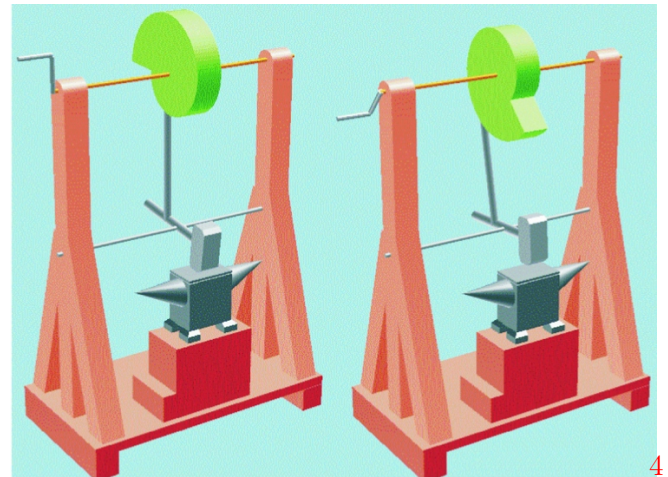


Begleitend zur Software wird eine mehrsprachige Broschüre angeboten, welche ebenfalls exemplarisch Bildschirm-Kopien, Fotos von Modellen und Originalskizzen gegenüberstellt. Zwei exemplarische Doppelseiten sind in Abb. 2 und 3 zu sehen.



In solchen Broschüren erweist sich die Sprachenunabhängigkeit geometrischer Skizzen und mathematischer Formeln als überaus nützlich. Wir wollen hier – einsprachig und maßgeschneidert auf die Zielgruppe „Geometrie-Lehrer mit physikalischem Basiswissen“ – eine ähnlich strukturierte Beschreibung der Maschinen Leonardo da Vincis versuchen.

Ein einfaches Beispiel



Eine erste Maschine Leonardos, die auch vom kinematisch-physikalisch unbedarften Museumsbesucher beim Anblick bzw. der Vorführung des Modells relativ leicht verstanden werden kann, ist das *Hammerwerk* (Abb. 4).

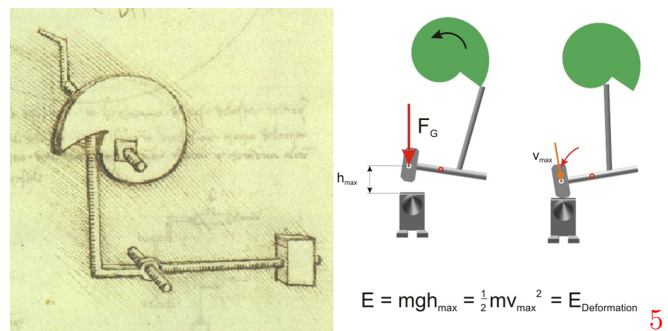
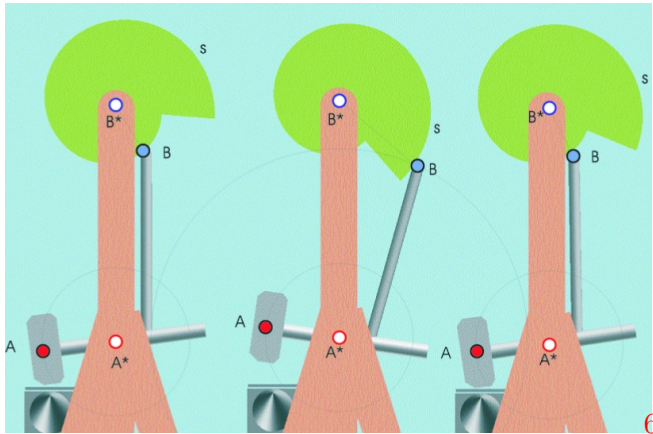


Abb. 5 zeigt links die Skizze Leonardos, die – auf sich alleine gestellt – schon wesentlich mehr Verständnis erfordert. Die physikalische Erklärung (nämlich dass hier potentielle in kinetische Energie umgesetzt wird) sollte allerdings unschwer einleuchten.

In diesem Rahmen ist natürlich die geometrisch-kinematische Erklärung die interessanteste: Die Simulation in Abb. 6 zeigt, wie ein Hammer durch Rotation einer Welle mit darauf befindlicher Spirale angetrieben wird. Dabei handelt es sich in jeder Lage um ein Viereck A, A^*, B, B^* (A^* und B^* fest) mit drei konstanten Stablängen und einer variablen (BB^*) – letztere wird durch die Position der Spirale bestimmt.



Der Mechanismus erinnert an ein Gelenkviereck mit einer variablen Stablänge, bei dem dafür der Winkel $\angle AA^*B$ konstant bleibt. Die Gestalt der Spirale spielt dabei keine tragende Rolle. Es könnte sich um eine logarithmische, archimedische oder ähnlich aussehende Spirale (wie in der Originalskizze) handeln.

Einteilung der Maschinen

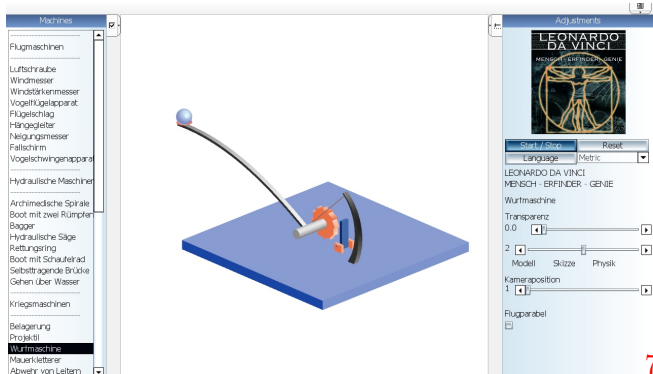
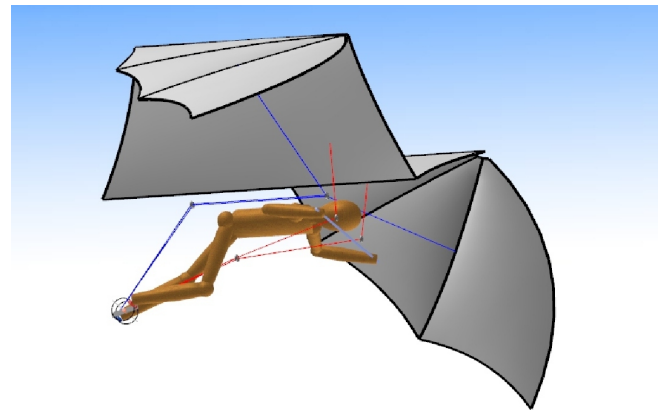


Abb. 7 zeigt einen Screenshot der Ausstellungsversion. In der linken Spalte kann man eine Maschine auswählen. Ob der Vielzahl der Maschinen wurde eine Einteilung der Maschinen in vier Gruppen vorgenommen: Flugmaschinen, hydraulische Maschinen, Kriegsmaschinen und zivile Maschinen. Das eben besprochene Hammerwerk fällt eindeutig in die Gruppe der zivilen Maschinen.

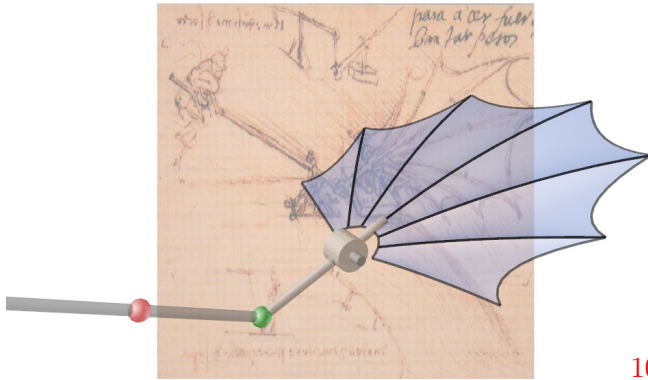
Flugmaschinen



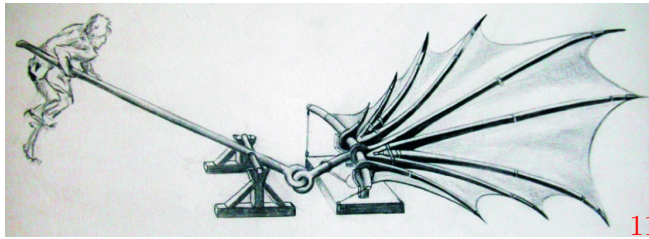
Der Anteil der zivilen Maschinen ist weitaus am größten. Trotzdem sind insbesondere Leonardos Flugmaschinen am populärsten. Tatsächlich träumte der Naturwissenschaftler sein Leben lang vom Fliegen, und er war zunächst ganz offensichtlich davon überzeugt, dass es der Mensch Ikarus gleichtun könnte (Abb. 8). Bei seinen Skizzen orientierte er sich am ehesten an den Flügeln der Fledermaus (Abb. 9).



Leonardo war klar, dass das Bewegen der Flügel einen enormen Kraftaufwand erforderte. Eine seiner Skizzen zeigt (in Abb. 10 hinter der Computeranimation durchscheinend, in Abb. 11 „reingezeichnet“ von Harald A. Korvas), mit welchen Gestängen er das menschliche Gewicht in den Antrieb einbringen wollte – hier liegt eine Kurbelschleife vor [WW70].

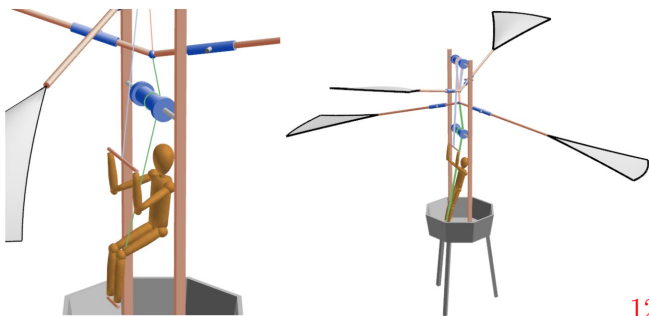


10



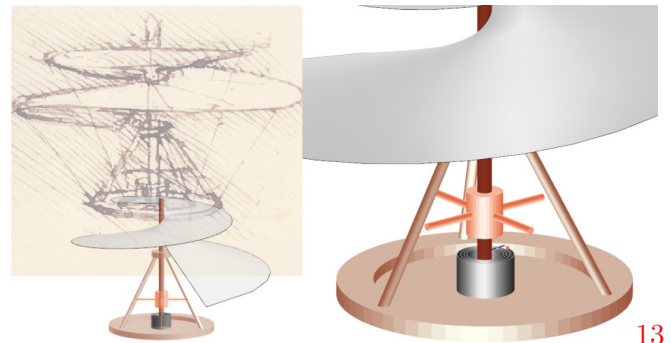
11

Die Tatsache, dass Vögel und Fledermäuse ihre Flügel so mühelos und schnell mit Muskelkraft bewegen können, hängt damit zusammen, dass diese Tiere viel kleiner sind als wir. Während die Masse beim „Kleinerwerden“ mit der dritten Potenz abnimmt, nimmt der Muskelquerschnitt nur mit dem Quadrat ab, und dieser ist für die Leistungsfähigkeit des Muskels verantwortlich [GG06].



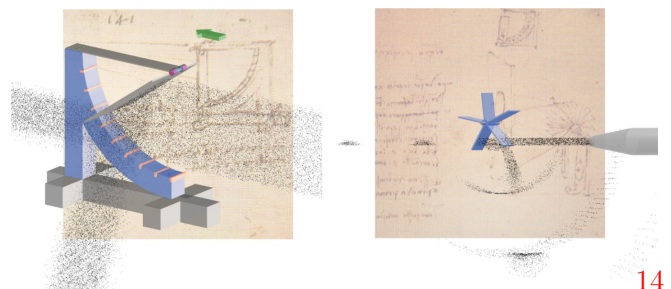
12

Einen seiner Apparate (Abb. 12) nannte der Meister „ornitottero verticale“, was in der Ausstellung mit „Vogelschwingenapparat“ übersetzt wurde. In der Bezeichnungsweise steckt hier zwar das Wort „Vogel“ drinnen, die Maschine hat aber mit dem Fliegen eines Vogels wenig zu tun. Über ausgefeilte Seilrollen-Mechanismen (vgl. auch Abb. 31) wird auch hier menschliche Muskelkraft in ein Auf und Ab von vier Flügeln umgesetzt, um eine vertikale Flugbewegung zu ermöglichen.



13

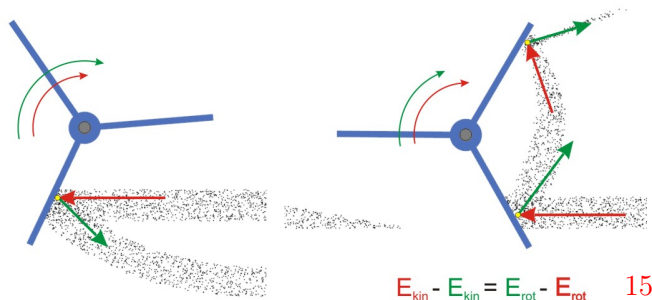
Auch zu dieser Bewegung gibt es eine Variante – gelegentlich als „erster Hubschrauber“ (Abb. 13) bezeichnet: Eine Tragfläche – i.W. eine schiefe geschlossene Strahlschraubfläche, die bereits an einen modernen Propeller erinnert – soll bei Rotation für Auftrieb sorgen. Der Antrieb kommt diesmal nur indirekt von Menschenkraft: Es wird eine Spiralfeder aufgezogen, welche die aufgestaute Energie dosiert und gebündelt abgeben kann. Die transparent durchschimmernde Originalskizze zeigt ein weiteres Mal die Intuition des Meisters.



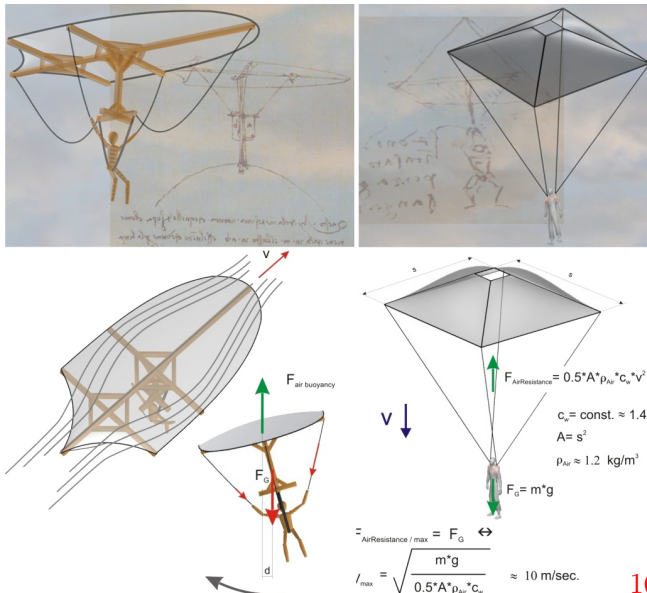
14

Leonardo – der schließlich ein Jahrhundert vor Galilei lebte – war sich der Kraft des Luftwiderstands voll bewusst und entwarf Maschinen, mit denen man

dessen Stärke messen konnte (Abb. 14 links) bzw. dessen Kraft umsetzen sollten (Abb. 14 rechts).

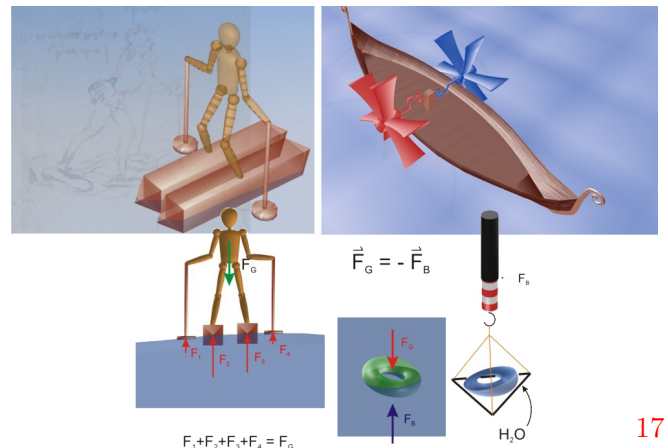


Um die entsprechenden Simulationen am Computer realistisch durchführen zu können, wurde ein Partikelsimulator implementiert. Dessen theoretische Grundlagen kann man heutzutage Schülern mittels Vektorrechnung und Energieerhaltungssatz unschwer verständlich machen (Abb. 15).

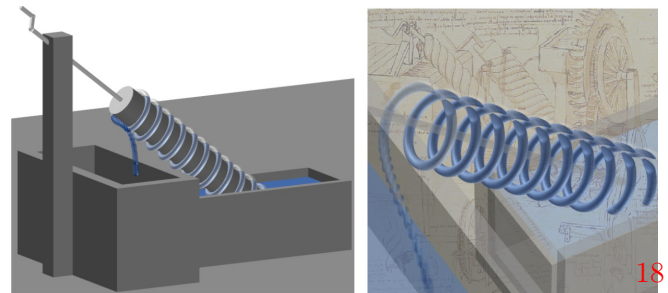


Selbst mit dem Wissen um zahlreiche Vorstudien des Toskaners auf dem Gebiet der Aerodynamik erscheinen uns seine Skizzen zum Fallschirmsprung oder Hänggleiten (Abb. 16) visionär – fast so, als ob Leonardo einige Jahrhunderte in die Zukunft sehen konnte. Waghalsige Versuche haben gezeigt, dass sein Fallschirm auch ohne die in der Computersimulation angedeutete Öffnung im Zentrum einigermaßen stabil in der Luft bleiben konnte.

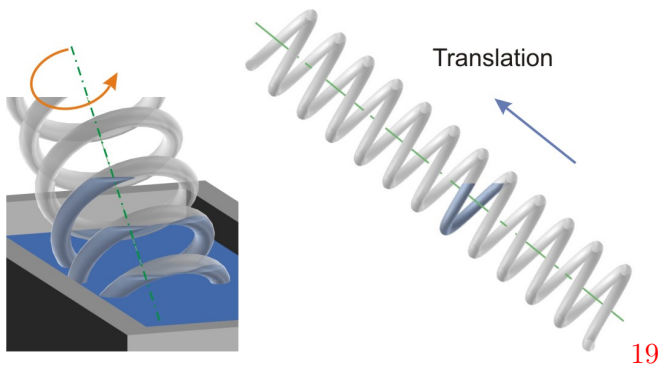
Hydraulische Maschinen



Vom Fluid Luft zum Fluid Wasser war es für den Praktiker Leonardo kein großer Schritt. Er nutzte gezielt das Auftriebsprinzip des Archimedes (Abb. 17 unten), um Schwimmreifen und „Wasserschiff“ zu propagieren, entwarf aber auch – in einer Zeit der Ruder- und Segelboote – Schiffsräder, die getrennt voneinander bedienbar waren und damit zugleich zur Steuerung verwendet werden konnten (Abb. 17 rechts).

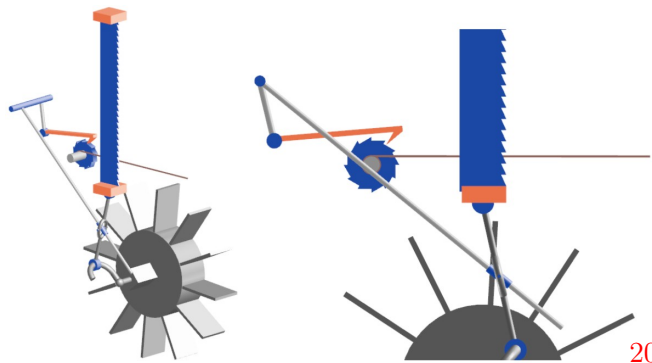


Die im 15. Jahrhundert wohlbekannte archimedische Wasserschraube verfeinerte der Ingenieur, indem er statt einer Wendelfläche, die in einem Hohlzylinder gedreht wird, eine Schraubrohrfläche, die um einen Drehzylinder gewickelt wird, einsetzt (Abb. 18). Allerdings soll diese Verbesserung bereits im antiken Ägypten bekannt gewesen sein. Die Computersimulation im Bild rechts (hinter welcher die Originalskizze liegt) zeigt, dass – abhängig vom Neigungswinkel des Zylinders – der Wasserstrahl nicht kontinuierlich ist, sondern immer wieder „abreißt“. In jedem Fall wird – bei geeigneter Neigung der Achse – Rotation effizient in Translation umgesetzt (Abb. 19).



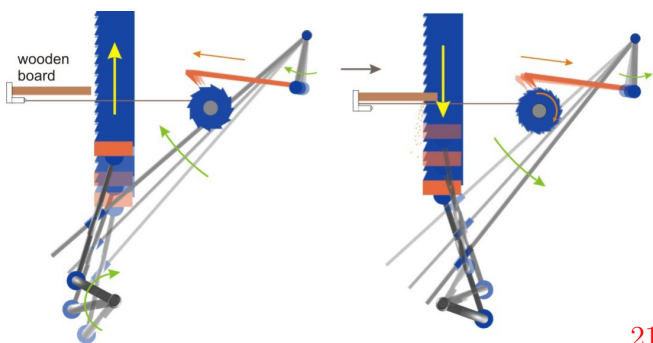
19

Bemerkenswert ist Leonardos hydraulische Säge (Abb. 20), welche noch heute in ganz ähnlicher Funktion verwendet wird. Dahinter steckt ein Schubkurbelgetriebe wie beim Otto-Motor. Der Antrieb erfolgt über ein Wasserrad.



20

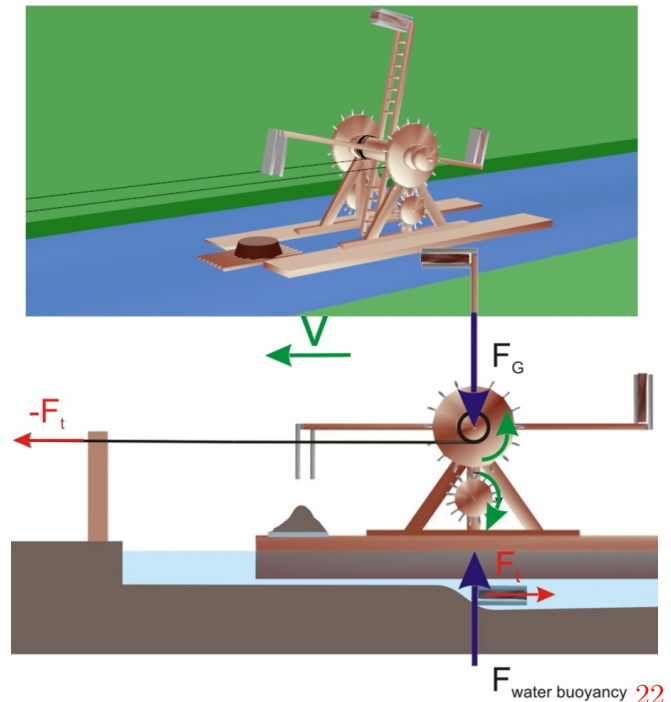
Während das Sägeblatt auf und ab oszilliert, ist ein weiterer subtiler Mechanismus integriert (Abb. 20 rechts): Ein Stab, der durch eine Öse in der Pleuellstange geführt wird, bringt eine Achse zum Schwingen.



21

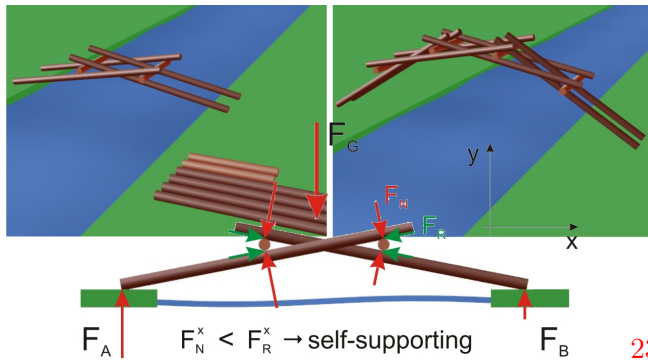
Mit dieser Achse ist ein Haken verbunden, der seinerseits über ein Zahnritzel die Auflagefläche des zu sägenden Holzes Stück für Stück heranzieht. Abb. 21 illustriert beide miteinander verknüpften Mechanismen nochmals.

Abb. 22 zeigt einen Schaufelbagger, der einen Kanal vor dem Versanden bewahren kann. Die Baggerschaufeln transportieren Material aus dem Untergrund, das eine 3/4 Umdrehung später bereits in einen Kahn geschüttet wird. Durch die Schaufelbewegung entsteht auch Antrieb, der über gespannte Seile kontrolliert werden muss.



22

Das letzte Beispiel dieses Abschnitts – die selbsttragende Brücke (Abb. 23) – ist eigentlich nicht direkt zu den hydraulischen Maschinen zu rechnen – es könnte genauso zu den Kriegs- oder Zivilmaschinen gezählt werden. Wie auch immer: Die geometrische Idee, die dahinter steckt, zeigt wieder einmal Leonardos Genialität: Aus nur 12 Stäben (8 langen und 4 kurzen) lässt sich eine Brücke bauen, die Belastungen in vertikaler Richtung gut verteilt.

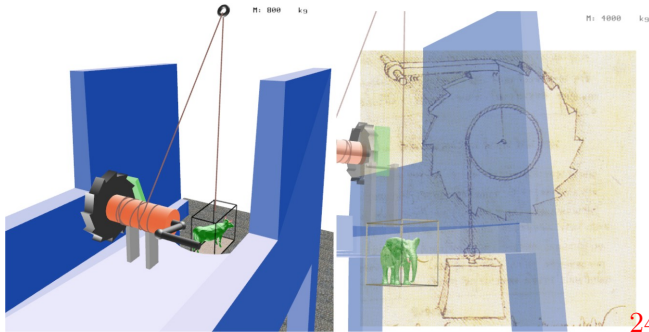


23

Die Stäbe verriegeln sich i.W. selbst. Spinnt man den Gedankengang weiter, dann lässt sich sogar ein Rad bauen, welches ohne Schrauben oder Nägel so stabil ist, dass man darin herumrollen kann, nahezu so wie in Leonardos berühmter Zeichnung vom Mann im Kreis, der ja das Logo der Ausstellung ist (Abb. 1).

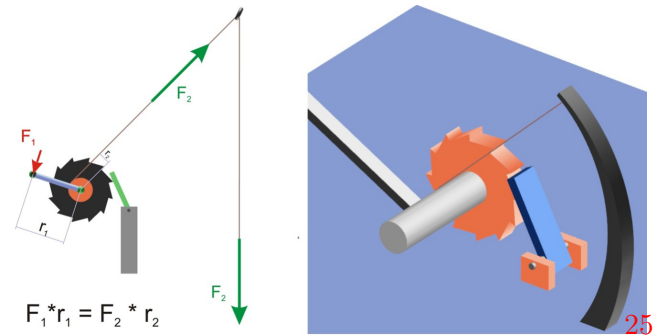
Detaillösungen

Bevor wir uns den Kriegsmaschinen und zivilen Maschinen da Vincis zuwenden, betrachten wir einige Skizzen, welche für nahezu alle seine Maschinen wichtig waren und Detailfragen lösten, die immer wieder auftraten.



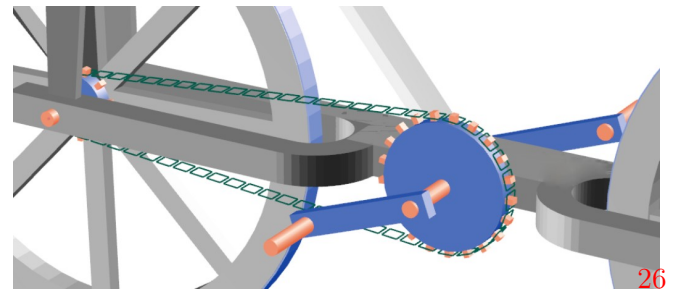
24

Ein immer wiederkehrendes Problem bei den Mechanismen da Vincis ist, dass ‘Aufziehbewegungen’ zwischenzeitlich angehalten und fixiert werden müssen. Abb. 24 rechts zeigt eine Skizze Leonardos für seinen Sperrmechanismus.

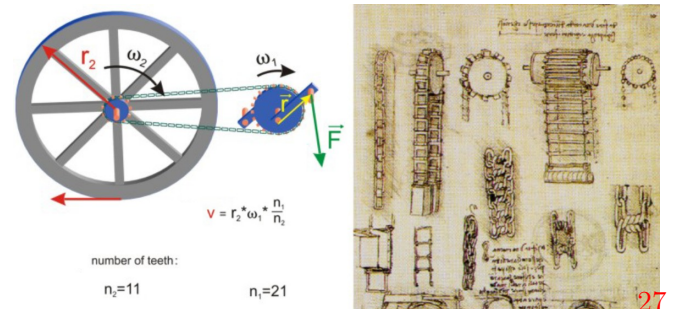


25

Mit ihm, so war er sich zu Recht sicher, könnte man nahezu beliebig schwere Lasten hochhieven (Abb. 25 links) oder überdimensionale Bögen für Wurfgeschosse spannen (Abb. 25 rechts). Aber auch das schon erwähnte Detail bei seinem Sägewerk (das periodische Heranziehen des zu sägenden Holzblocks, Abb. 20) konnte mit einem solchen Sperrmechanismus elegant gelöst werden.

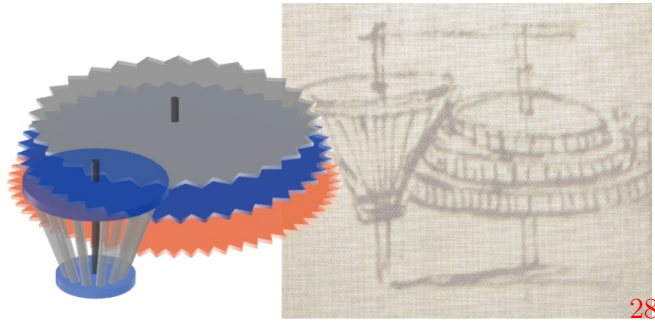


26



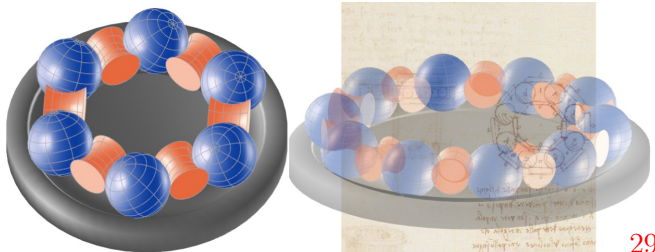
27

So genial wie einfach war für den Vordenker das proportionale übersetzen von Umdrehungszahlen mittels einer Gliederkette (Abb. 26, 27).



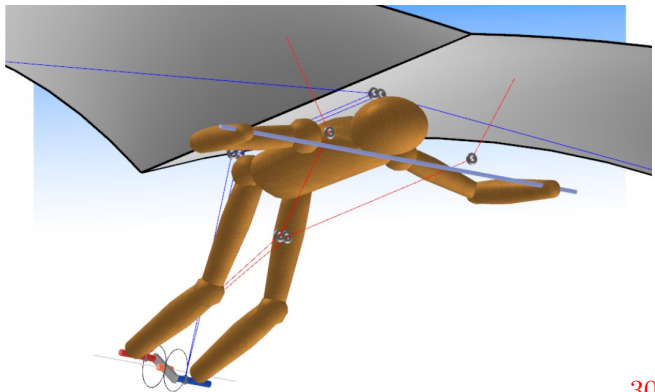
28

Nicht nur das: Leonardo überlegte sich bereits einfache Getriebe, bei denen verschiedene Übersetzungsverhältnisse von ein- und demselben Mechanismus bewerkstelligt werden konnten, indem er ein einfaches Kegelrad für den Antrieb verwendete, in das Zahnräder verschiedener Größe und Zähnezahleinklinken konnten (Abb. 28).



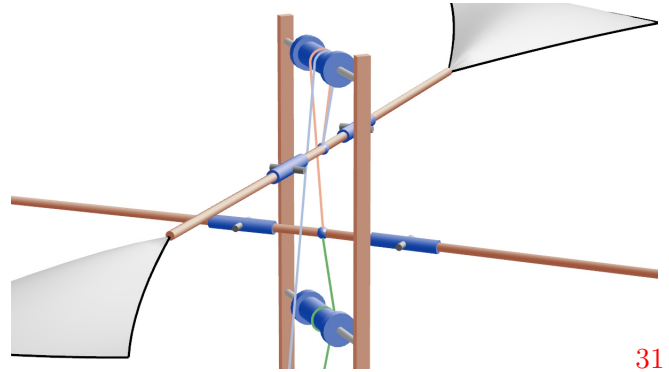
29

Um große Lasten (mitunter ganze Lastkräne) möglichst reibungsfrei um lotrechte Achsen drehen zu können, entwarf er Kugellager (Abb. 29). Damit ein konstanter Abstand zwischen den Kugeln gewahrt bleibt, schob er torsusförmige Rollen ein.



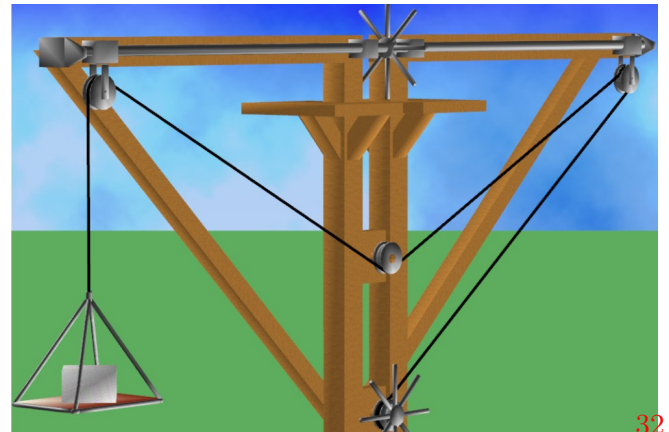
30

Seilrollen spielen bei den Maschinen des Meisters eine fundamentale Rolle. Beim Umlenken von Kräften entwickelte da Vinci eine wahre Meisterschaft. Man betrachte z.B. ein Detail aus seiner Flugmaschine, wo durch simples Verkürzen bzw. Verlängern von Seilzügen die Schwingen völlig korrekt bewegt werden (Abb. 30).



31

Fast noch komplizierter werden die Seilzüge bei seinem „ornitottero“ (Abb. 31) – ein wahres Vergnügen für jeden Ingenieur, den Mechanismus nachzuvollziehen.



32

Seilzüge spielen nicht zuletzt bei seinen Entwürfen für verschiedenste Lastkräne eine bedeutende Rolle (Abb. 32).

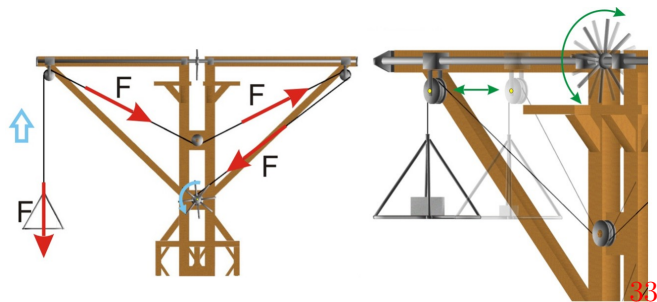
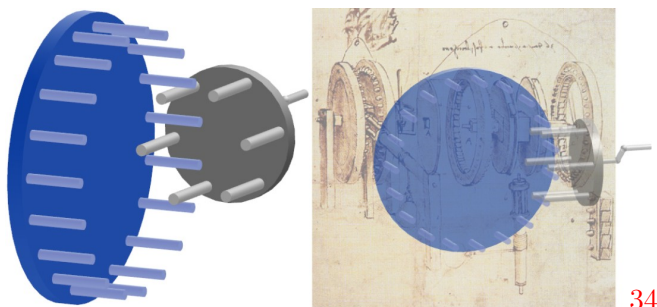
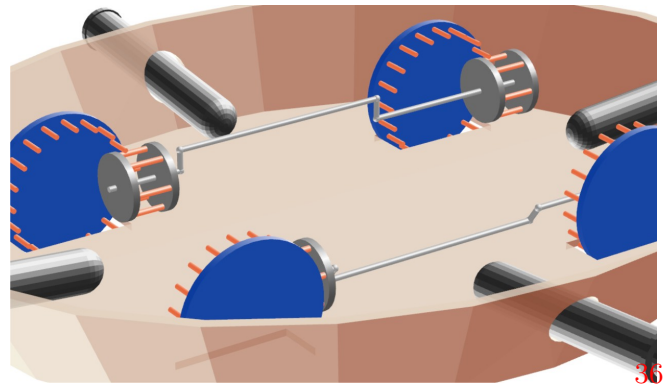
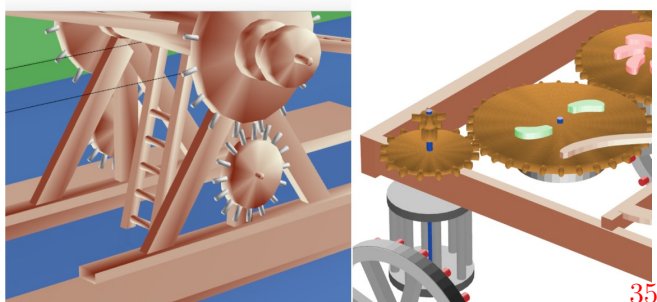
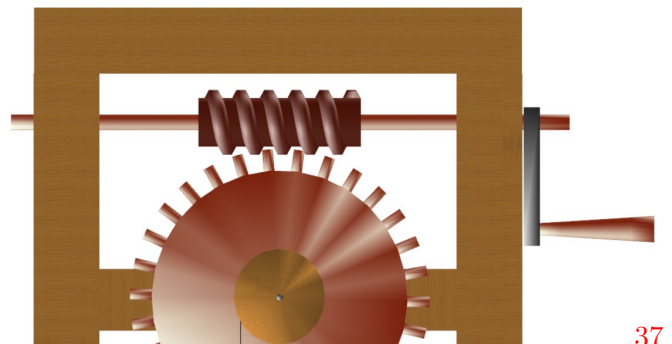


Abb. 33 illustriert die Aufteilung der Kräfte in speziellen Positionen der Seilaufhängung.

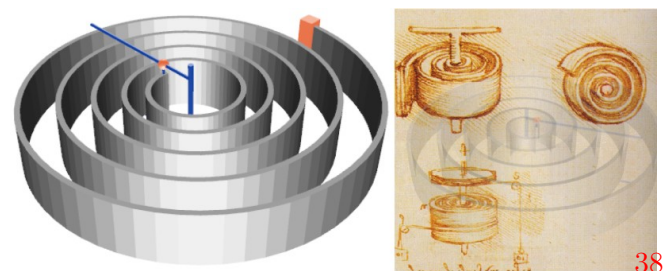


Besondere Wichtigkeit hatte die stabile Übertragung von Drehungen um senkrecht schneidende Achsen.

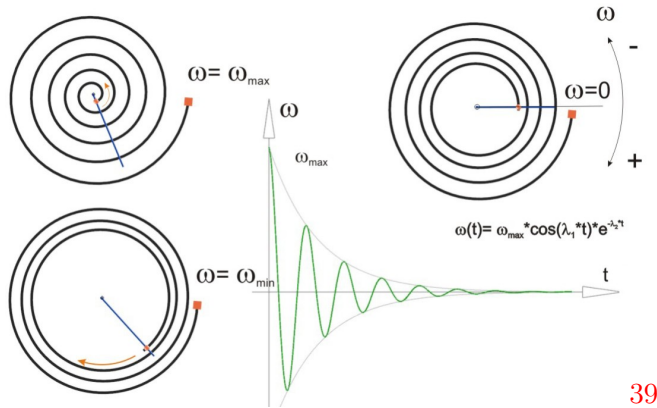


Damit löste der Toskaner zahlreiche Antriebsprobleme. Zunächst entschied er sich für käfigartige Zahnräder (Abb. 34), die in seinen Arbeiten immer wieder vorkamen, etwa wenn es um den Antrieb von Schaufelrädern bzw. des „aufziehbaren Vehikels“ (Abb. 35) oder des fahrbaren Kanonenwagens (Abb. 36) ging.

Leonardo erkannte aber durchaus, dass solch simple Zahnräder ihren Zweck nur mangelhaft – und vor Allem unter großen Abnützungserscheinungen – erfüllen konnten. So entwickelte er bald neuartige Zahnräder, die noch heutzutage als sehr brauchbar eingestuft werden können. Tatsächlich verwendete er Zahnflanken, die mit den heute üblichen Schneckenrieben verglichen werden können (Abb. 37).

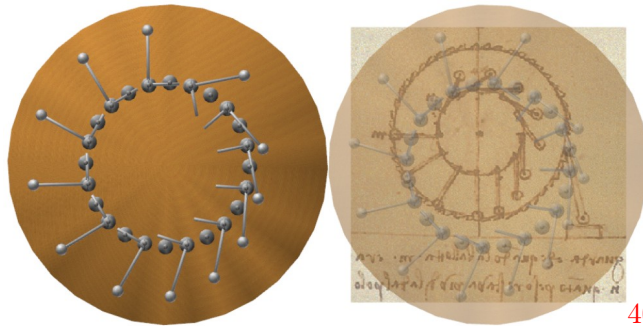


In seinen Ideen manifestierte es sich immer mehr, durch Federkraft kurzfristig und ohne weiteres Zutun „aufgestaute Energien“ zur Verfügung zu haben (Abb. 38), etwa beim „Hubschrauber“ oder beim „Automobil“.



39

Das Schwingen der Feder ist mehr oder weniger gedämpft, sodass immer wieder Energie zugeführt werden muss. Die mathematische Theorie solcher Schwingungen ist heute „Mittelschulstoff“ (Abb. 39).



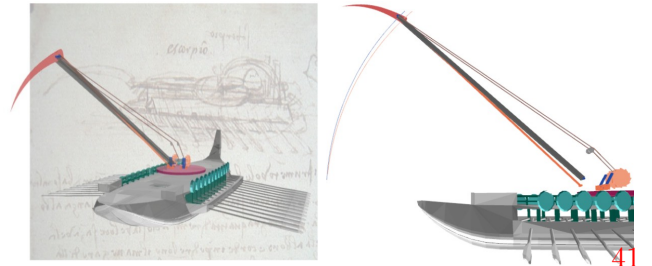
40

Wie viele vor und nach ihm war da Vinci vom Gedanken beseelt, Maschinen herzustellen, die keiner weiteren Energiezufuhr bedurften. Dass es ein „Perpetuum mobile“ nicht geben kann, ist mittlerweile natürlich Allgemeinut. Immerhin entwickelte Leonardo ein seltsam anmutendes Gerät (Abb. 40), welches durch Schlenkern und Kippbewegungen eine lang andauernde Drehung eines Rades ermöglichte – insbesondere, wenn durch Gleitmittel die Reibung an der Achse minimiert wird.

Kriegsmaschinen

Die beginnende Neuzeit war nicht so idyllisch, wie man meinen möchte. So entkam Leonardo in Mailand im Alter von 32 Jahren nur knapp einer Pestepidemie – entwarf daraufhin die „ideale Stadt“ mit verbesserten sanitären Bedingungen. Der Vegetarier,

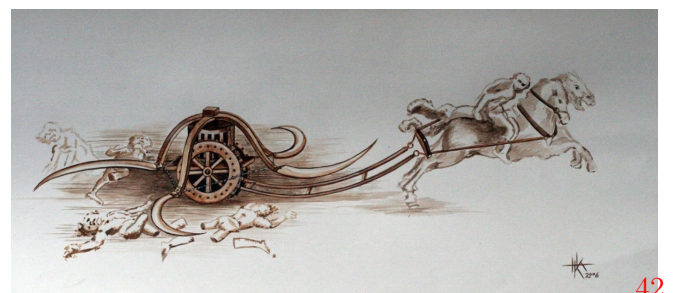
der Krieg als „bestialischen Unsinn“ bezeichnete, bot sich andererseits Auftraggebern wie Ludovico Sforza als Militäringenieur an. In seinen Notizen vermerkt er allerdings: „Um das Hauptgeschenk der Natur, nämlich die Freiheit, zu bewahren, erfinde ich Angriffs- und Verteidigungsmittel für den Fall, dass wir von ehrgeizigen Tyrannen bedrängt werden.“



41

Zur See schien es wichtig, feindliche Schiffe am Entkommen zu hindern bzw. diesen gleichzeitig irreparable Schäden zuzufügen. Zu diesem Zweck dachte sich der Ingenieur einen Sichel-Mechanismus aus, der kinematisch gesehen ein klassisches Gelenkviereck darstellt (Abb. 41), mit einem Sperrmechanismus hochgezogen werden kann und dessen scharf geschliffener Teil mit enormer Geschwindigkeit und Treffsicherheit eingesetzt werden konnte. Das Gerät konnte zusätzlich beliebig um seine vertikale Achse gedreht werden, was beim Manövrieren klare Vorteile bot.

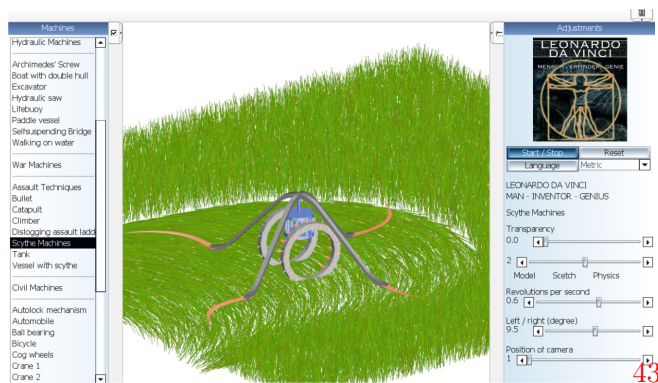
Der Sichelwagen (Abb. 42), ein schon in der Römerzeit bekannter Streitwagen, wurde mit Hilfe von Pferden bewegt und war dazu gedacht, die gegnerischen Reihen im wahrsten Sinne des Wortes niederzumetzeln.



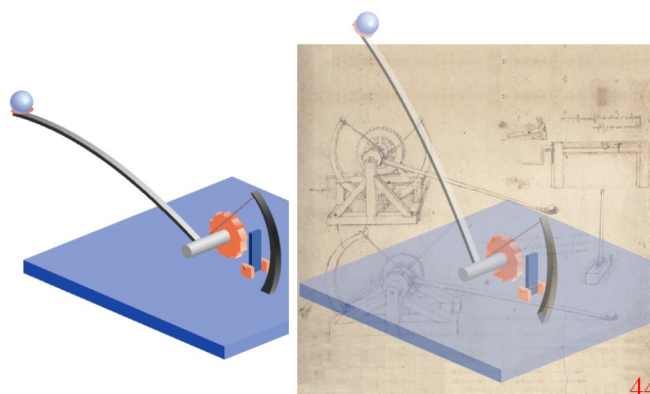
42

Leonardos Skizzen dazu sind erschütternd (Abb. 42 zeigt eine „Reinzeichnung“ von Harald A. Korvas). Vielleicht sollten sie seine Empfehlung bestärken, das

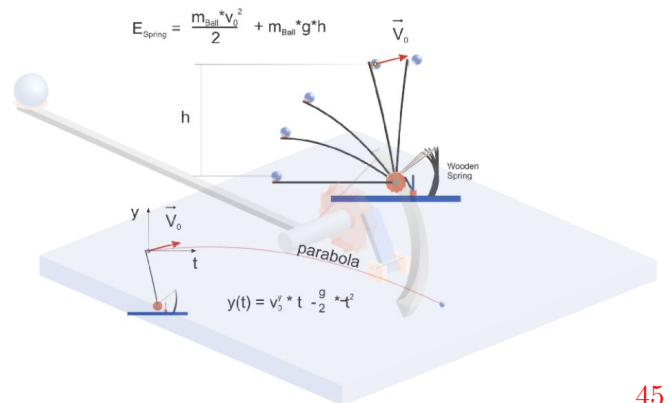
Gerät nicht einzusetzen, weil es sich, falls die Pferde durchgingen, gegen die eigenen Reihen wenden könnte.



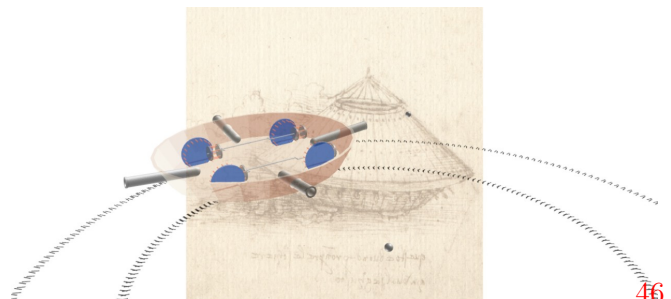
Unsere Variante wurde schließlich eine Art Mähmaschine, wobei der Benützer des Programms den Ehrgeiz entwickeln kann, durch Änderung der Umdrehungszahlen beim linken oder rechten Rad Kurven zu fahren, um ein Feld mit 20 000 Halmen zu mähen. Abb. 43 zeigt einen Screenshot der englischsprachigen Variante des Programms, auf dem man erkennen kann, wie Schieberegler eingesetzt werden können, um eine solche Steuerung vorzunehmen.



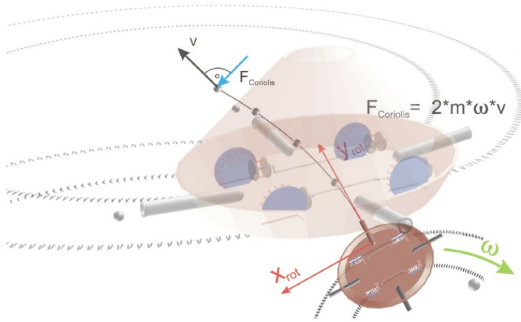
Auch die Wurfmaschine (Abb. 44 bzw. 45) war aus dem Altertum bekannt. Kombiniert mit Details wie einem Sperrmechanismus wurde sie jedoch nach Leonardos Überlegungen berechenbarer und effizienter.



Ein wichtiges Ziel unserer Software war es, komprimiert so viel Information wie möglich zu liefern. Man kann daher bei fast allen Simulationen die Skizze des Meisters, aber auch eine geometrisch bzw. manchmal auch mathematisch-physikalische Erklärung einblenden. Abb. 45 soll dies am Beispiel der Wurfmaschine zeigen, wo ein Vektordiagramm, die Gleichung der Wurfparabel bzw. die Art der Umsetzung der Energien knapp durch Formeln beschrieben werden. Dies mag den nicht entsprechend geschulten Benützer der Software manchmal überfordern, bietet aber – so hoffen wir – auch die Gelegenheit, dass die Software im Schulunterricht beim fächerübergreifenden Unterricht zum Einsatz kommen kann.



Als letztes Kriegsgerät sei da Vincis „Panzer“ erwähnt (Abb. 46), eine große, aber sehr wendige Maschine für 8 Mann Besatzung, die einen festen Holzpanzer besitzen sollte. Angetrieben wird das Gerät durch zwei Paare miteinander verbundener Zahnräder.



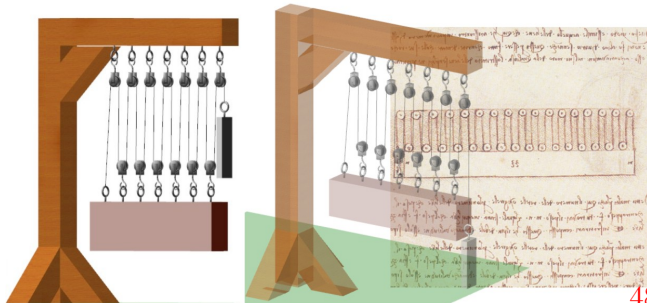
47

Durch Änderung des Verhältnisses der Winkelgeschwindigkeiten kann die Maschine – wie auch das Sensenwerk von vorhin – gelenkt werden. Vier regelmäßig verteilte Kanonen sollten in alle Richtungen feuern können (Abb. 47).

Zivile Maschinen

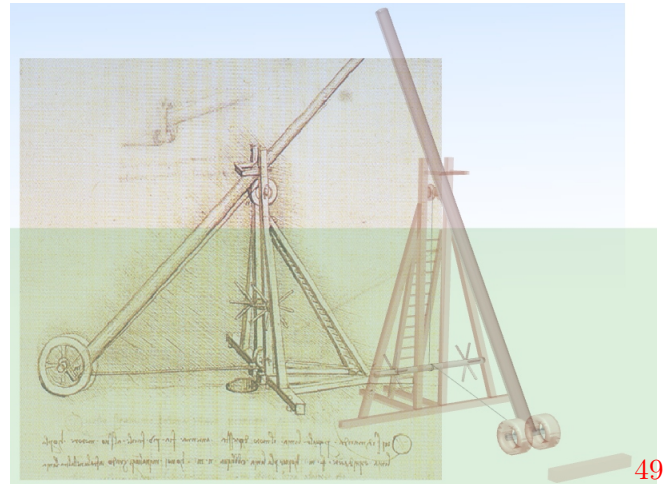
Als letzten großen Block wollen wir noch einige der zivilen Maschinen Leonardos anführen.

Das Heben schwerer Lasten war zu allen Zeiten ein Problem, dem es mit physikalisch-geometrischen Wissen beizukommen galt. Flaschenzüge waren schon im Altertum bekannt. Der Ingenieur der beginnenden Neuzeit versuchte, solches Wissen auf eine solide Basis zu stellen.



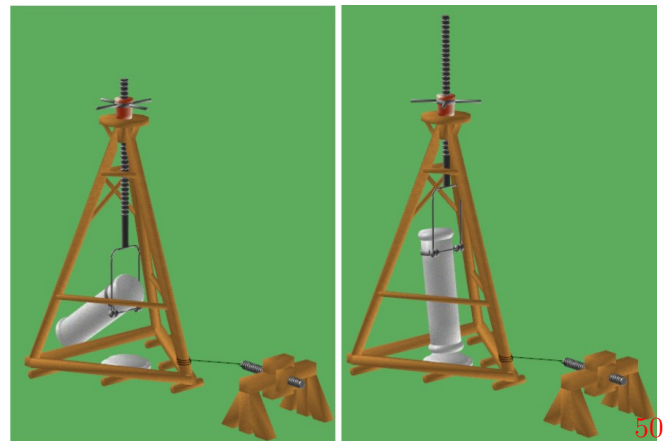
48

Der in Abb. 48 dargestellte Flaschenzug wird demnach von Leonardo genau beschrieben. Er vergrößert bei Anordnung von n Rollen die geleistete Hubkraft um das n -fache.

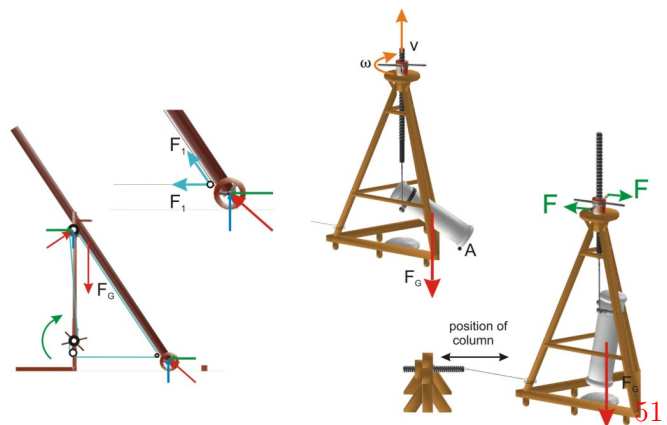


49

Ein Problem der damaligen Baumeister war es, lange Gebilde (z.B. vorgefertigte Pfeiler oder Säulen) aufzurichten. Da Vincis Vorschlag war eine sehr effiziente Maschine, die mit zwei Rollen und einer Winde ausgestattet war (Abb. 49 und Abb. 51 links).

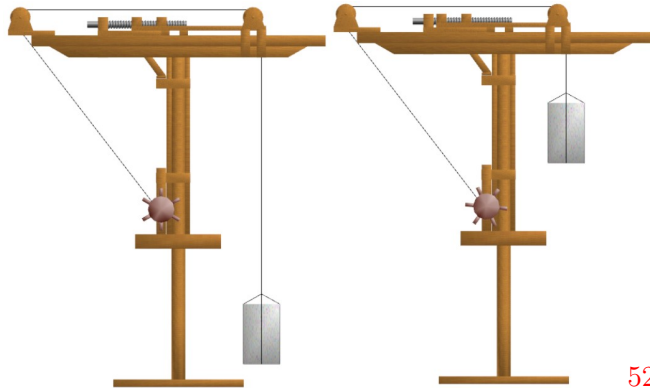


50

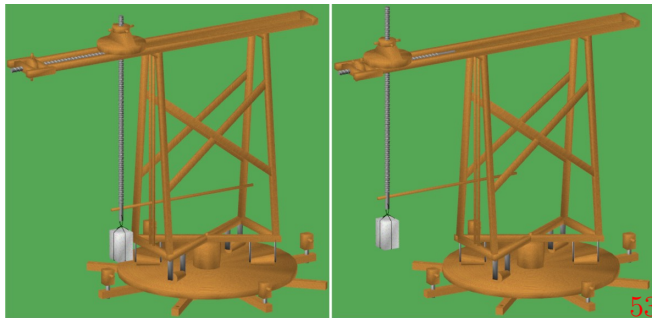


51

Für das Heben von Säulen überlegte er sich einen noch ausgeklügelteren Mechanismus, der mit zwei Schraubgewinden arbeitete und damit besonders exakt und sicher gesteuert werden konnte (Abb. 50 und Abb. 51 rechts).

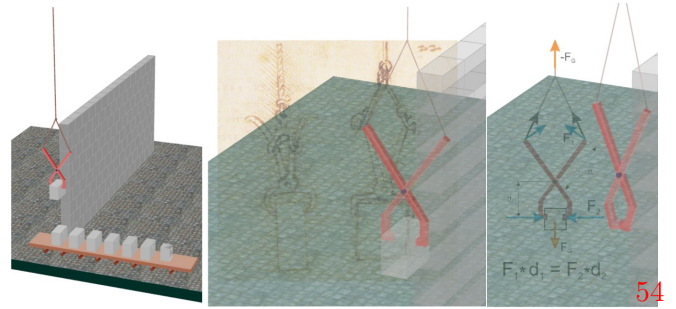


Bei seinen Entwürfen verschiedener Kräne (Abb. 52 und 53) kam Leonardo schon in die Nähe dessen, was heute im Bereich der Lastkräne immer noch Standard ist. Wichtig war, dass Lasten ausreichend hoch gehoben, axial verdreht und radial verschoben werden konnten, ohne dass dadurch die Stabilität des Krans in Gefahr geriet.

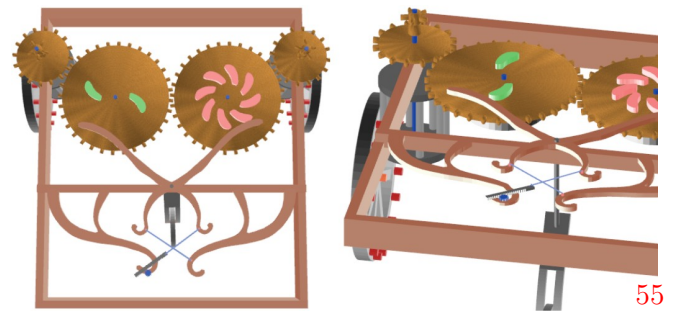


Damit der Kran mitsamt seiner Last gedreht werden konnte, schlug der Ingenieur ein Kugellager (Abb. 29), aber auch Kegelrollungen, was in der damaligen Zeit sicher revolutionär war, vor.

Abb. 54 zeigt eine bemerkenswerte Überlegung, die es erleichtern sollte, Ziegel mit Maschinen in eine vorgegebene Position zu bringen. Es handelt sich um eine Zange, die sich unter Einwirkung des Gewichts des Ziegels selbst schließt und nach Absetzen des Ziegels selbstständig öffnet.



Leonardo war offensichtlich nicht nur für Lösungen im Großen. Eines seiner Prinzipien lautete: „Betrachte! Zerlege! Beschreibe!“ Durch das Zerlegen entstehen immer wieder neue Detailfragen, die es zu lösen gilt. Durch das Beschreiben wird man gezwungen, das Problem auszuformulieren – und damit nicht selten schon zu einer möglichen Lösung geführt.

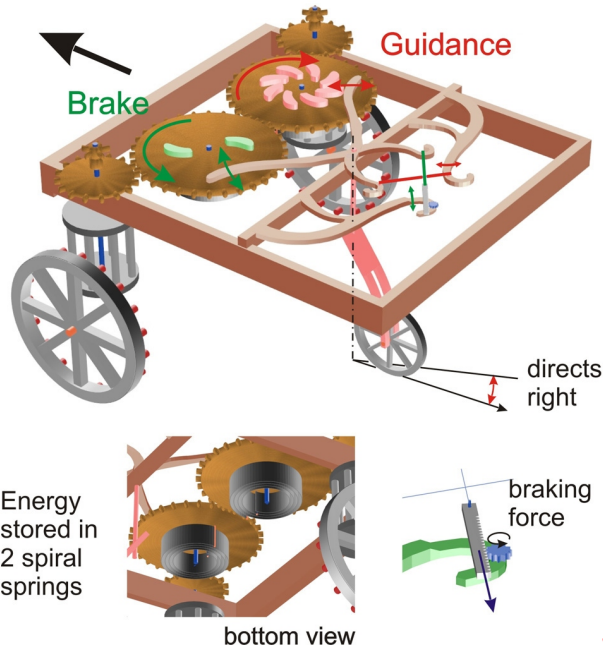


Eine seiner auch vom modernen, geometrisch geschulten Menschen gerade noch nachvollziehbaren Erfindungen war das „aufziehbare Automobil“ (Abb. 55 und 56). Wir verbrachten nicht wenig Zeit damit, das entsprechende (nicht funktionsfähige) Ausstellungsstück zu analysieren und zu verstehen. Dementsprechend war auch die Realisierung im Computerprogramm eine Herausforderung.

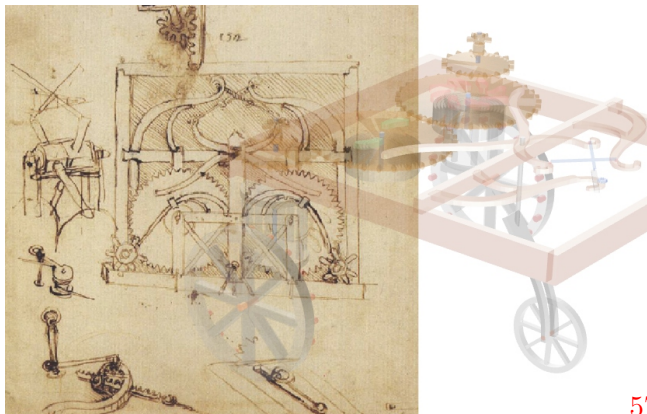
Der Antrieb des Gefährts ist eigentlich simpel: Zwei Spiralfedern (zu sehen in der Untersicht in Abb. 56) sind fix mit Zahnrädern verbunden und bringen diese beim Entspannen zur Drehung. Durch weitere Zahnräder wird die Drehung auf die eigentlichen Räder übertragen.

Interessant ist das dritte, kleinere Rad in der Mitte, welches nur geradeaus oder leicht nach rechts fahren kann. Es dient einerseits als drittes Standbein, aber auch zur Lenkung: Die rot eingezeichneten Nocken am linken waagrechten Zahnrad bringen das

Rad zum Schwingen, sodass der Wagen abwechselnd geradeaus und nach rechts fährt (dies war angeblich zur Überraschung des Publikums gedacht, das plötzlich das Vehikel auf sich zukommen sah).

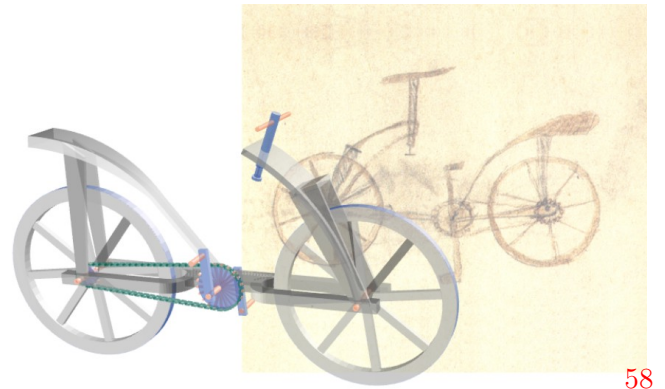


Die Bremsvorrichtung war dem rechten waagrechten Zahnrad zugeordnet. Durch Pressen auf die grünen Nocken wurde der Reibungswiderstand erhöht.

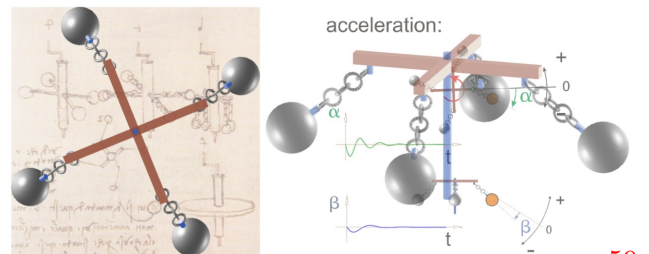


Detailinstruktionen sind in den Skizzen des Genies zu finden (Abb. 57). Tatsächlich wurde ein solches Gerät bei Hofe zum Erstaunen Aller eingesetzt und war über eine „Kurzstrecke“ durchaus einsetzbar. Auch wenn die Sache wohl eher der Unterhaltung diene,

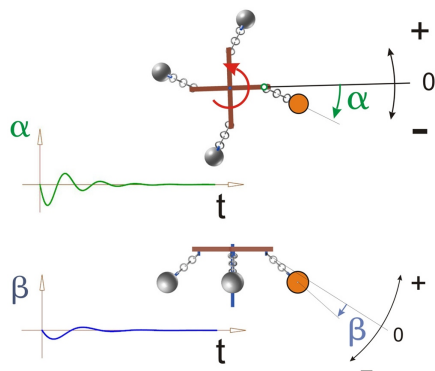
zeugt sie davon, dass Leonardo seinen „Baukastensatz“, den er im Lauf der Zeit entwickelt hatte, sinnvoll zu kombinieren wusste.



Nahezu einfach mutet dagegen die Skizze eines Fahrrads (Abb. 58) an – wobei nicht gesichert ist, ob die Zeichnung tatsächlich aus Leonardos Feder stammt oder erst später seinem Werk beigelegt wurde. Zuzutrauen ist dem großen Genie der Entwurf allemal, obwohl die Erfindung damals eine Sensation gewesen wäre. Man bedenke, dass das Fahrrad erst Jahrhunderte später „erfunden“ wurde – und zunächst mit seinem überdimensionalen Vorderrad ganz anders ausgesehen hat!

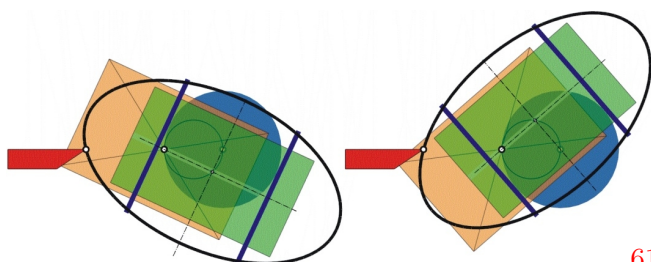


Überlegungen, die mit schnellen Umdrehungen von Massen, ja sogar mit deren Beschleunigung bzw. Verzögerung zu tun hatten, waren für da Vinci Standard. Abb. 59 zeigt hinter unseren Simulationen eines Schwungrads seine entsprechenden Skizzen, Abb. 60 physikalische Überlegungen dazu.



60

Als weiteres Beispiel sei eine geometrische Rarität angeführt, die ebenfalls Leonardo da Vinci zugeschrieben wird [WW70] – sie wurde im Software-Paket allerdings nicht implementiert, weil es kein Exponat dazu gab. Ein Zusatzprogramm kann auf der Webseite www.uni-ak.ac.at/geom/leonardo zur Verwendung im Unterricht heruntergeladen werden.

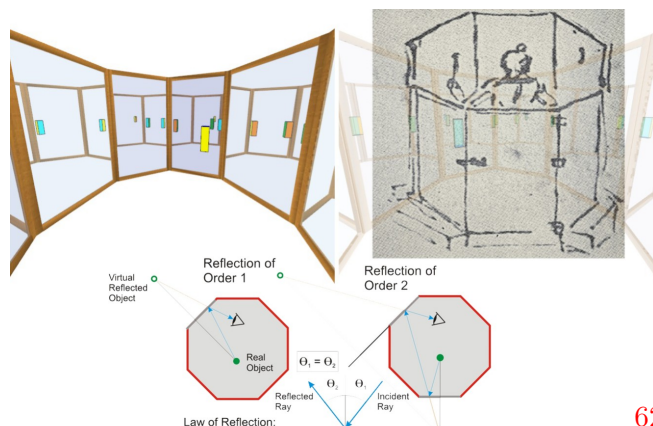


61

Es handelt sich um das sog. Ovalwerk (Abb. 61), das in der Lage ist, exakte elliptische Profile zu schneiden. Geometrisch gesehen handelt es sich dabei um die Umkehrung einer Ellipsenbewegung: Es werden nämlich die beiden Schenkel eines rechten Winkels durch zwei feste Punkte geführt.

Dadurch bleibt das Schneidewerkzeug (der Drehmeißel) fest. Der „Drehtisch“ besteht aus zwei Platten (grün und rot). Die rote Platte dreht sich um ihr Zentrum P , die grüne Platte dreht sich auf der roten mit, wird aber gleichzeitig so verschoben, dass zwei mitgeführte (blau eingezeichnete) Schienen stets einen festen (ebenfalls blauen) Kreis durch P berühren. Dadurch wandert der Mittelpunkt der grünen Platte auf einem Thaleskreis mit halb so großem Radius wie der blaue Kreis. Wir interpretieren nun diesen Thaleskreis und den doppelt so großen Kreis als Kardan-

kreispaar. Die grüne Platte, die mit dem kleinen Kardankreis fest verbunden ist, beschreibt dann gegenüber dem festen blauen Kreis eine Ellipsenbewegung: Jeder Punkt des grünen Tisches hat also gegenüber dem festen System eine Ellipse als Bahnkurve. Wir brauchen nur noch „irgendwo“ einen Drehmeißel positionieren, das aus einem mit der grünen Platte fest verbundenem Rohmaterial eine Ellipse ausschneidet.

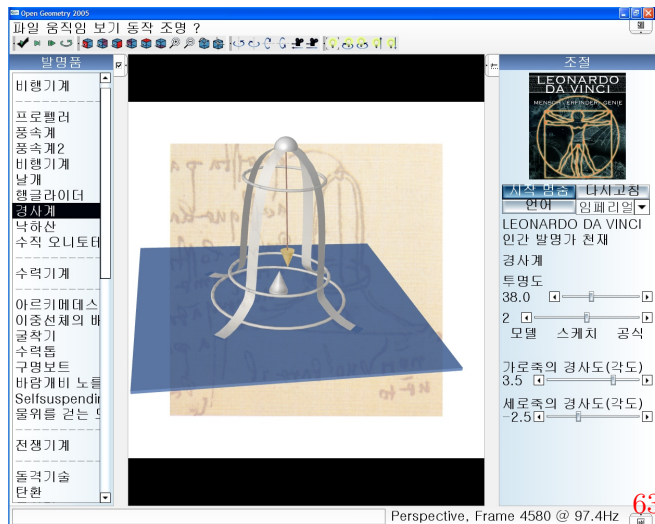


62

Den Abschluss soll eine Überlegung Leonardos bilden, wie man aus einem einzigen Blickpunkt vollständige Informationen über ein räumliches Objekt erhalten kann: Man stelle das Objekt (oder auch einen Menschen) in ein „Spiegelkabinett“. Dann sieht man zusätzlich Reflexionen, die helfen, das Objekt zu „rekonstruieren“ (Abb. 62).

Zusammenfassung, Literaturhinweise

Die Beschäftigung mit den zahlreichen technischen Skizzen Leonardos ist nicht nur vom historischen, sondern auch vom geometrischen (und natürlich physikalischen bzw. technischen) Standpunkt aus lohnenswert. Didaktisch aufbereitet kann sie im Unterricht fächerübergreifend eingesetzt werden, vorzugsweise im Geometrie- bzw. Physikunterricht, u.U. im EDV- oder Sprachunterricht – beim derzeitigen Stand der Software natürlich in Englisch, in weiterer Folge vielleicht aber in Italienisch, Spanisch oder Französisch. Abb. 63 zeigt einen Screenshot von der koreanischen Version der Software.



Die Entwicklung der beschriebenen Software wurde von www.eventmarketing.com finanziell unterstützt, wo die entsprechende CD exklusiv erhältlich ist (Tel. 0043-1-714 77 88). Zusätzliches Material und eine kurze Bedienungsanleitung ist unter www.uni-ak.ac.at/geom/leonardo zu finden. Das Softwarepaket enthält auch ein Büchlein mit dem Titel *Leonardo da Vinci: Mensch-Erfinder-Genie* von R. Fink. Zahlreiche Originalskizzen findet man weiters z.B. in [MC88] bzw. der unten angegebenen Zusatzliteratur.

Einige der vorgestellten Beispiele sind ausführlicher und mit begleitendem theoretischen Hintergrund in [GG06] und [GG07] aufbereitet. Neben der Software-Entwicklung an der Universität für angewandte Kunst gibt es neuerdings eine weitere am Markt erhältliche – getrennt entwickelte – Software [TZL06].

[GG06] G. Glaeser: *Der mathematische Werkzeugkasten*. Spektrum Verlag/Elsevier, Heidelberg, 2. Auflage 2006.

[GG07] G. Glaeser: *Geometrie und ihre Anwendungen in Kunst, Natur und Technik*. Spektrum Verlag/Elsevier, Heidelberg, 2. Auflage 2007.

[WW70] W. Wunderlich: *Ebene Kinematik*. Bibliographisches Institut Mannheim (Band 447/447a), 1970.

[MC88] M. Cianchi: *Die Maschinen Leonardo da Vincis*. Becocci Editore, 1988.

[TZL06] M. Taddei, E. Zanon, D. Laurenza: *Leonardo dreidimensional. Mit Computergrafik auf der Spur des genialen Erfinders*. Belser, 2006

Weitere Informationen zu den Maschinen bzw. Zeichnungen Leonardos:

F. Zöllner: *Leonardo da Vinci*. Taschen Verlag, Köln, 2005

H. Grothe: *Leonardo da Vinci. Erfinder und Konstrukteur*. Reprint-Verlag-Leipzig, 2003

F. Fehrenbach: *Leonardo da Vinci. Natur im Übergang. Beiträge zu Wissenschaft, Kunst und Technik*. Fink Verlag 2002

Ein durchaus kritischer und lesenswerter Beitrag zum Leben und Wirken Leonardos findet sich in der Ausgabe 06/2006 der Zeitschrift GEO (pp.14-50).