

# Überlegungen zur Übertragung bionischer Systemdesignmuster auf die Fabriklayout- und Materialflussplanung

Considerations for the transfer of biomimetic system design patterns to facility layout- and material flow planning

Daniel Tinello<sup>1</sup>  
Herwig Winkler<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut für Technische Logistik  
Technische Universität Graz

<sup>2</sup>Lehrstuhl für Produktionswirtschaft  
Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg

**M**ithilfe der Bionik konnten im Laufe der vergangenen Jahre in einigen Wissenschaftsdisziplinen erfolgreiche neuartige Ansätze zur Problemlösung initiiert werden. Im vorliegenden Beitrag wird überprüft, ob mithilfe der Bionik auch Prinzipien und Designansätze in der Natur zu finden sind, die bei der Entwicklung von neuartigen Fabriklayouts angewendet werden können. In der belebten Schöpfung findet man einige Systeme die sich an kurz- und langfristige Änderungen erfolgreich anpassen. Außerdem wachsen natürliche Systeme in einer Weise, dass alle involvierten Elemente während des Wachstums ohne Störung weiterfunktionieren. Könnten die Fabriklayouts der Zukunft wie Bienenwaben, Spinnennetze oder Nautilus-Schale angeordnet sein? Und hätte dies überhaupt einen Mehrwert für die industrielle Praxis? Damit beschäftigt sich vorliegender Beitrag.

[Schlüsselwörter: Bionik, Fabriklayoutplanung, Materialflussplanung, Bibliometrie]

**O**ver the last few years, by using biomimetics successful novel approaches to problem solving have been initiated in some scientific disciplines. This contribution examines if the usage of biomimetics can provide principles and system design patterns in nature that can be applied in the development of novel factory layouts. In the living creation there are some systems that successfully adapt to short- and long-term changes. Natural systems also grow in such a way that the functionality of all elements involved is ensured without any disturbance during growth. Could the factory layouts of the future be arranged like honeycomb, spider webs or nautilus shells? And would this add any value for industrial practice? This is the subject of the present contribution.

[Keywords: biomimetics, facility layout planning, material flow planning, bibliometrics]

## 1 EINLEITUNG

Wissenschaftler, welche die biologische Struktur von Tieren, Insekten und Pflanzen erforscht haben, entdeckten, dass diese ausgesprochen raffiniert und zum Teil mit speziellen Fähigkeiten ausgestattet sind, die oft widersprüchlichen Anforderungen erfüllen. Zum Beispiel fanden Barthlott und Neinhuis heraus, dass die Oberfläche von Lotusblättern über eine spezielle Struktur verfügt und dadurch die Fähigkeit der Selbstreinigung ermöglicht [BN97]. Forscher konzentrierten sich darauf diese Struktur nachzuahmen und haben Anwendungen für Produkte wie schmutzabweisende Textilien oder selbstreinigende Fassaden und Autolacke entwickelt [MMS+07]. Interessante Strukturen konnten auch bei Meerestieren beobachtet werden. Zum Beispiel sind Haie mit einer Hautstruktur ausgestattet, die aus mikroskopisch kleinen Rillen besteht, welche die Reibung in turbulenten Strömungen reduzieren. Diese Technik wird bereits angewendet um den Luftwiderstand von Flugzeugflügeln zu reduzieren [BM91].

Der Ansatz Probleme unter Einbeziehung der Natur zu lösen wird Bionik genannt. Von Gleich et al. beschreiben den Begriff wie folgt: „Bionik ist der Versuch, von der Natur zu lernen. Dabei geht es um die Entwicklung von Innovationen auf der Basis der Erforschung... biologischer Strukturen, Funktionen, Prozesse und Systeme.“ [GPP+07, S. 18]. In unseren bisherigen Arbeiten haben wir bereits die Fragestellung untersucht, ob Bionik bei der Materialfluss- und Layoutplanung unrealistische Träumerei oder ein realistisch umsetzbares Potential für Produktivitäts- und Wirtschaftlichkeitsverbesserungen darstellt [TW13, TWG+17].

Hierbei unterteilen wir die belebte Schöpfung in zwei Bereiche welche aus unserer Sicht Potential für eine Logistikanwendung hätten: 1.) Bionik bei Wachstumsprozessen von Fabriken und 2.) Bionik zur Gestaltung von Input-Output-Prozessen. Bei der Ersten untersuchten wir Wachstumsprozesse von Fibonacci, welche auch bereits für die Städteplanung angedacht werden. Bei der Zweiten lagen Bauten von Termiten, Weberameisen und Honigbienen im Zentrum. Als Ausblick wurde damals in den Raum gestellt mithilfe solcher Analogien aus der Natur, vorhandene Fabriklayouts in bio-inspirierte Fabriklayouts umzubauen. Diese bio-inspirierten Fabriklayouts sollten dann den traditionell erstellten Layouts gegenübergestellt werden. Dabei sollte als Vergleichswert die Transportleistungsziffer dienen [AF09, VDI99]. Nachfolgende Beschreibungen bilden nun einen kurzen Abriss über den Inhalt der aktuellen Forschungen.

## 2 VORSTUDIEN UND LAUFENDE ARBEITEN ZUM THEMA IM WISSENSCHAFTLICHEN SCHRIFTTUM

Um auch für die Logistik zu untersuchen, ob es in der Literatur schon wissenschaftliche Arbeiten gibt, in denen die Bionik für die Logistik erfolgversprechend ist und inwiefern diese Arbeiten zum vorliegenden Thema beitragen, wurden ausgewählte Methoden der Bibliometrie angewendet. Dabei wurde gemäß den Empfehlungen von Ball und

Tunger vorgegangen [Bal14, BT05]. Mittels unterschiedlicher Abfragepärchen wurden zwei der umfassendsten wissenschaftlichen Datenbanken (Scopus und Web of Science) durchsucht. Erfasst wurden dabei alle Publikationen, die mit den Bereichen Bionik und Logistik eine Beziehung aufweisen und dem Bereich der Ingenieur- und Wirtschaftswissenschaften angehören. Wie die Analyse der Veröffentlichung gezeigt hat (vergleiche [TKJ+17]), ist ein Trend zu biologisch inspirierten Lösungen im Bereich der Logistik erkennbar. Zwischen 2003 und 2013 ist die Menge der Veröffentlichung, als auch der Zitationen stark angestiegen. Das führende Land in Bezug auf Publikationsmenge ist mit 54,48 % der Publikationen die Volksrepublik China, gefolgt von Deutschland und den USA.

Um die Verbindungen zwischen den einzelnen Forschungsthemen der Logistik und Bionik zu visualisieren wurden die analysierten Publikationen den entsprechenden Fachgebieten zugeordnet. Die Ergebnisse wurden in nachfolgender Matrix (Abbildung 1) zusammengefasst, welche zeigt, dass besonders die Prinzipien der Verhaltensbiologie bereits in verschiedenen Logistikforschungsthemen angewendet werden, wobei die Transportlogistik den größten Anteil trägt. Die Matrix zeigt aber, dass einige Themenfelder noch unbearbeitet sind. So wurden auch potentiell biologisch inspirierte Fabriklayouts bisher noch nicht erschlossen.

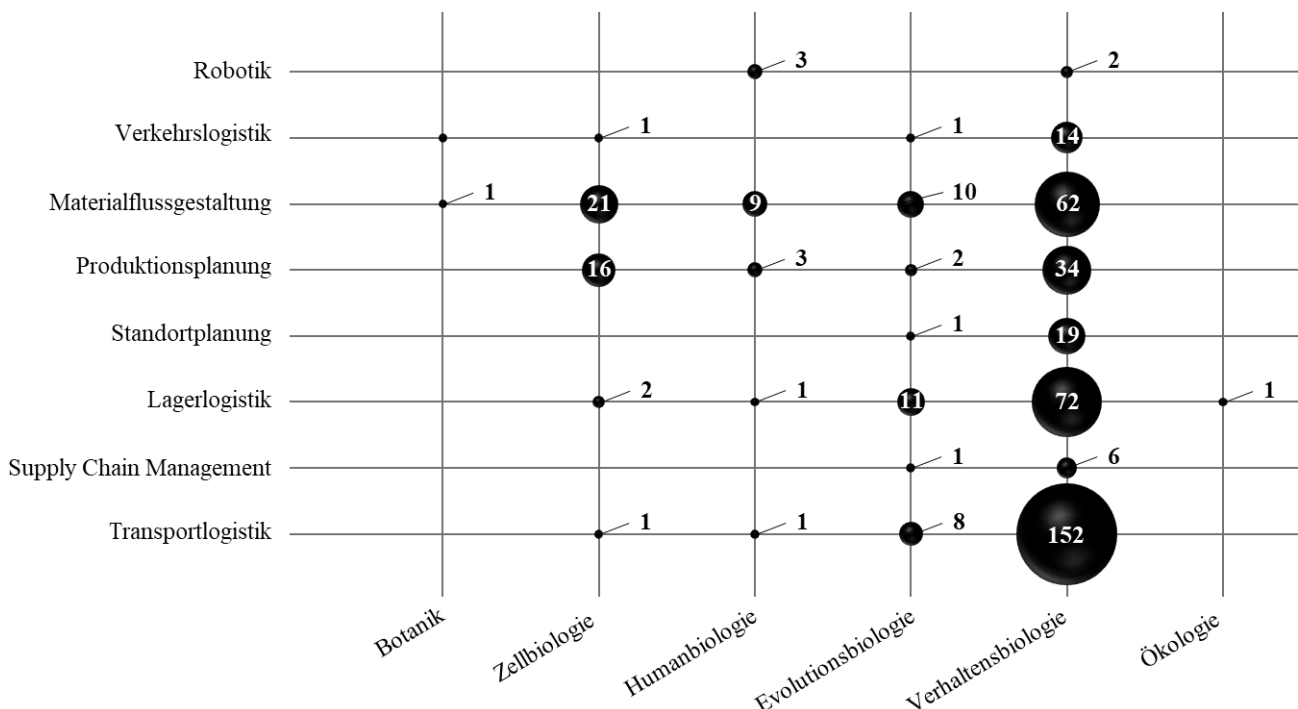


Abbildung 1. : Überschneidungen der Themengebiete Logistik und Bionik in den analysierten Publikationen [TKJ+17]

### 3 VERGLEICH VON KLASSISCHEN LAYOUTPLANUNGSVERFAHREN VERSUS BIO-INSPIRIERTEN LAYOUTPLANUNGSVERFAHREN

#### 3.1 METHODIK UND BEWERTUNGSSYSTEM

Für die Untersuchung von verschiedenen Planungsmethoden für Fabriklayouts wurden in einer Fallstudie (vergleiche [TJW16]) drei österreichische Produktionsbetriebe analysiert und hierbei auf reale Materialflussdaten und Layoutpläne zurückgegriffen. Aufgrund der wissenschaftstheoretisch geforderten maximalen Kontrastierung bei Fallstudien [Wro05], erfolgte die Auswahl der Fabriken in der Art, dass die ausgewählten Produktionsstätten eine unterschiedliche Materialflussstruktur als auch eine unterschiedliche Branchen- und Unternehmenszugehörigkeit aufweisen. Zu Beginn wurden die originalen Layouts mittels CAD-Tool [TTJ12] abgebildet und die Transportleistungsziffer<sup>1</sup> ermittelt.

$$TC = \sum \sum t_{ij} \cdot e_{ij}$$

mit

$t_{ij}$  := Transportintensität zwischen Betriebsmittel  $i$  und Betriebsmittel  $j$  und  
 $e_{ij}$  := Distanz zwischen Betriebsmittel  $i$  und Betriebsmittel  $j$

Danach wurden klassische als auch bio-inspirierte Layoutplanungsverfahren auf die jeweils zugrundeliegende Fabrik angewandt und neue Layouts erzeugt und in der Folge miteinander verglichen.

Da in der Praxis nicht nur quantitativer Größen wie der Materialfluss alleine für die Layoutbewertung ausschlaggebend sind [MM73], wurden auch folgende weitere Kriterien verwendet um anhand dieser die Layouts mittels einer Multikriterienbewertung einander gegenüberstellen zu können [RGM+09]:

- Zielkategorie 1: Materialfluss; Transportleistungsziffer
- Zielkategorie 2: Flächenbedarf; benötigte Rechteckfläche als auch Netzfläche
- Zielkategorie 3: Planungsaufwand; Berechnungsaufwand, Flächenformveränderungen als auch Komplexität der Methode
- Zielkategorie 4: Veränderungsfähigkeit; Flexibilität und Wandlungsfähigkeit

<sup>1</sup> Die Transportleistungsziffer ist oft die Zielgröße für Optimierungsaufgaben bei Planungsprojekten. Sie ist ein nützliches Maß für die Bewertung einer entwickelten Layoutversion [VDI99].

Bei den qualitativen Kriterien wurde anhand sachlogischer Zusammenhänge bewertet, welche in Stufen unterteilt wurden. Jede Stufe wurde einem Bewertungsäquivalent zugeordnet. Ein solches Beispiel ist die Wandlungsfähigkeit. Ist folgende Aussage erfüllt werden 10 Punkte vergeben: „Das erzeugte Layout ermöglicht die Reaktion auf ungeplanten Flächenbedarf und erleichtert die Umsetzung.“ Durch diese Objektivierung ist sowohl eine bessere Transparenz als auch Nachvollziehbarkeit gegeben [HMR10]. Das Ergebnis der Multikriterienbewertung ist in Abbildung 6 dargestellt.

#### 3.2 GRUNDLAGEN KLASSISCHER LAYOUTPLANUNGSVERFAHREN

Für vorliegende Arbeit wurden auf jede der untersuchten Fabriken drei „klassische“ Layoutplanungsverfahren [TW13] angewendet nämlich: das Kreisverfahren nach Schwerdtfeger [VDI99, KSG84], das Dreiecksverfahren nach Schmigalla [Sch70, VDI99] und der Algorithmus für die Reihenfolgeverbesserung [VDI08]. Anhand dieser wurde jeweils ein Ideallayout erstellt. Abbildung 2 zeigt beispielsweise die neue Layoutstruktur von Fabrik C bei Verwendung der Dreiecksmethode von Schmigalla.

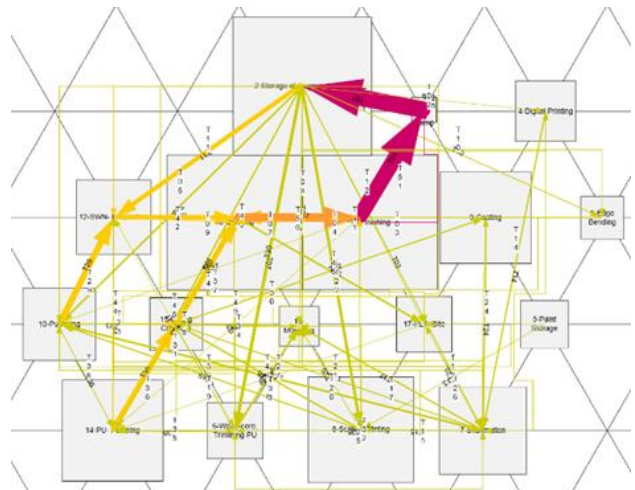


Abbildung 2. Fabrik C, erzeugtes Ideallayout unter Verwendung der Dreiecksmethode von Schmigalla [TJW16]

#### 3.3 BESONDERHEITEN DER BIO-INSPIRIERTEN LAYOUTPLANUNGSVERFAHREN

Nach der Anwendung der „klassischen“ Verfahren auf die drei Fabriken wurde intensiv darüber nachgedacht welche Analogien in der Natur passend sind um ein bio-inspiriertes Layout zu erzeugen. Es wurden drei Analogien gefunden welche nun näher erläutert werden.

- Bienenwaben als Systemdesignmuster (vgl. dazu [TWJ+15])

Bienenwaben bestehen aus standardisierten Sechsecken, die mit vordefinierten Abmessungen konstruiert werden. Diese Waben bestehen aus Bienenwachs, welches von einem Bienenvolk produziert wird. Doch die Bienen bilden ihre Honigwaben nicht von Natur aus sechseckig, sondern diese Form entsteht aus einer thermischen Deformation bedingt durch die Arbeit in den Zellen [PHR+04]. Das Sechseck ist neben dem Dreieck und dem Viereck die einzige regelmäßige Form, die eine flache Oberfläche vollständig und lückenlos füllen kann (auch bekannt als Teselation bzw. Parkettierung) [Gla14, Szp11]. Ein weiterer Vorteil der Sechsecke, verglichen mit Dreiecken und Vierecken, ist die Tatsache, dass die Fläche von Sechsecken bei gleichem Umfang größer ist. Dies resultiert in einem minimalen Materialbedarf von Bienenwachs für die Wände, mit derselben zugrundeliegenden Fläche [Szp11]. Und hier ist die Analogie der Natur für das vorliegende Layoutplanungsproblem: Der Kraftfluss der über die Wachswände der Bienenwaben erfolgt, kann mit dem Materialfluss einer Fabrik verglichen werden. Die Wabenwände sollten die Wege der Transporte innerhalb der Fabrik symbolisieren (die allerdings nichts mit den Transportwegen der Bienen zu tun haben). Weil durch das Verwenden sechseckiger Formen ein minimaler Umfang bei gleicher Fläche erreicht wird, ist anzunehmen, dass dadurch auch der Materialfluss minimiert werden kann. In den biologisch inspirierten Layouts soll auch eine zweite Analogie zur Anwendung kommen: Die Brutkammer (siehe Abbildung 3 oben). Diese befindet sich im Zentrum und es halten sich dort die meisten Bienen auf [BM08, Fri27]. Diese Tatsache kann in die Praxis durch die Anordnung des Bereiches mit den meisten Materialflüssen (innerhalb der Fabrik), in das Zentrum des Fabriklayouts erfolgen. Um dieses betriebsame mittlere Areal werden die anderen Organisationseinheiten mit niedrigeren Materialflüssen angeordnet. In Abbildung 3 (unten) ist die Anwendung dieser Analogie auf Fabrik C zu sehen. Die detaillierte Vorgehensweise des Verfahrens wird im Beitrag [TWJ+15] näher erläutert.

- Die Echten Radnetzspinnen (*Araneidae*) als Systemdesignmuster (vgl. dazu [TJW16])

Spinnen bauen eine große Anzahl von verschiedenen Netzstrukturen, zum Beispiel Radnetze welche ein beträchtliches Einzugsgebiet für Beute bei gleichzeitig geringem Verbrauch von Spinnenseide bieten. Während ihrer gesamten Lebensdauer bauen diese Spinnen immer identische Radnetze und ändern diese nur der Größe nach, entsprechend den jeweiligen lokalen Verhältnissen [Dal08]. Abbildung 4 (oben) zeigt den Aufbau eines Radnetzes. Dies besteht aus drei Hauptelementen: Radiale Speichenfäden (Radius), die sich mit der Nabe verbinden, Rahmenfäden mit der Funktion der Außenbegrenzung als auch Startpunkt für die radialen Speichenfäden und die klebrigen Fäden der Fangspirale. Viele Spinnen sitzen dabei in der

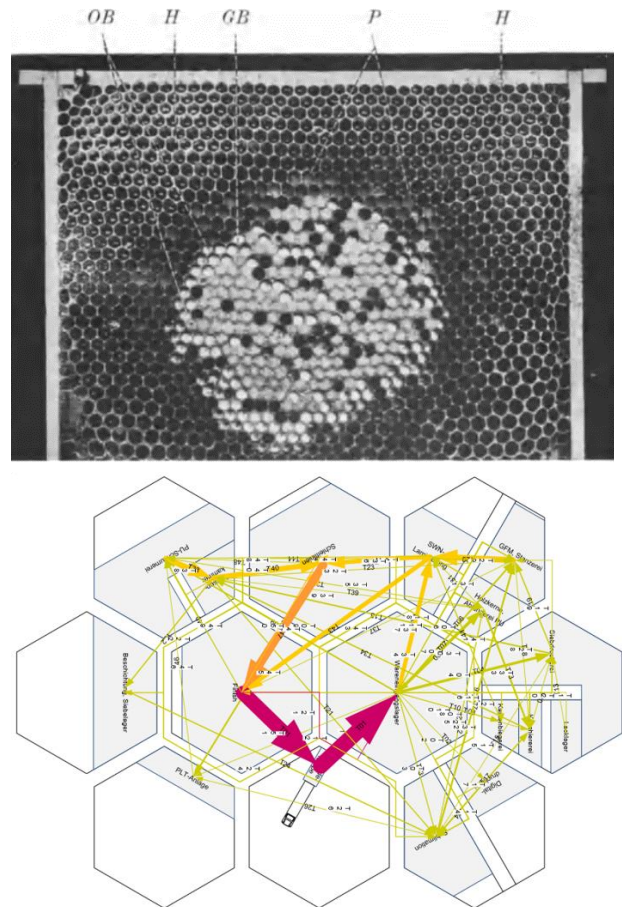


Abbildung 3. (oben): Arrangement innerhalb einer Brutkammer [Fri27], (rechts): bionisch inspiriertes Fabriklayout von Fabrik C unter Verwendung der Bienenwabenmethode [TWJ+15]

Mitte der Nabe und der Kopf ist nach unten gerichtet. Jedes der acht Beine ist im Kontakt mit einem der Radialfäden, um auch die geringsten Vibrationen zu bemerken. Sobald z.B. eine Fliege im Netz gefangen wird, wird die Spinne aktiv und bewegt sich radial hauptsächlich entlang der nichtklebrigen Speichenfäden zu dem Opfer, beißt die Beute und spinnt sie für eine spätere Mahlzeit ein. Dann wird die Beute in die Nabe transportiert. Das bedeutet zum Beispiel, dass wenn sich die Beute auf der linken Seite des Spinnennetzes befindet und die aktuelle Position der Spinne auf der Unterseite ist, die Spinne nicht den kurzen Weg (entlang der Hypotenuse) nimmt um sich direkt zur Beute links oben zu bewegen, sondern immer wird sie sich entlang der Speichenfäden bewegen (entlang der Katheten). Also zuerst nach oben entlang der nichtklebrigen Speichenfäden ins Netzzentrum, und von dort aus nach links wieder entlang den nichtklebrigen Fäden bis zur Beute. Die Spinne verwendet niemals die tangentialen klebrigen Fäden als Transportweg [Bie40, Dal08]. Die Analogie war in diesem Fall, dass die Fangspirale den Produktionsbereich repräsentiert, die nichtklebrigen Fäden können als Transportwege gesehen werden, die Nabe symbolisiert die Lagerflächen und die freie Zone kennzeichnet eine

Rangierfläche. Wegen der Anzahl von Betriebsmitteln in den untersuchten Fabriken erwiesen sich die 18 radialen Fäden im Netz der eigentlichen Streckerspinne (*Tetragnatha*) mit einem Winkel von ca. 20° als am besten geeignet [Foe11]. In Abbildung 4 (unten) ist die Anwendung dieser Analogie auf Fabrik C zu sehen. Die detaillierte Vorgehensweise des Verfahrens wird im Beitrag [TJW16] näher erläutert.

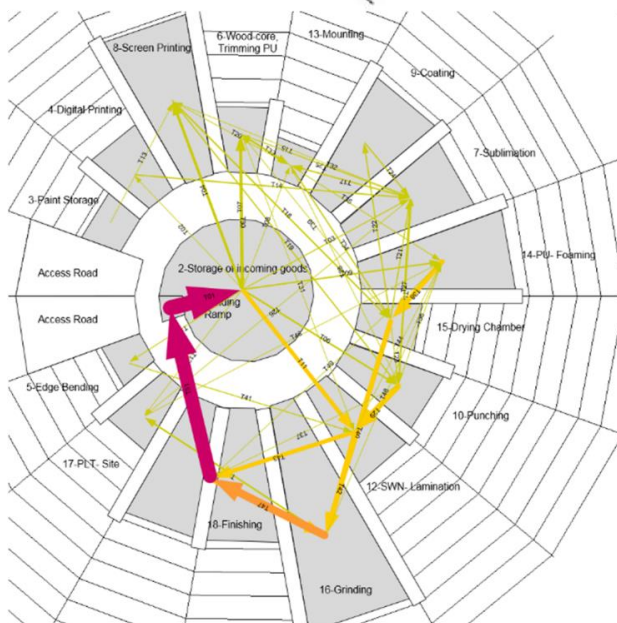
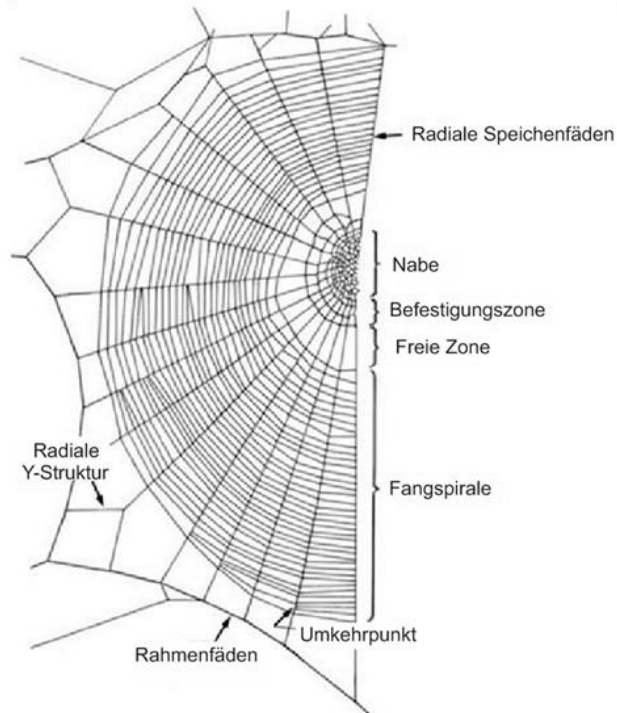


Abbildung 4. (oben): Aufbau und Benennung der Radnetzstrukturen [Foe11], (unten): bionisch inspiriertes Fabriklayout von Fabrik C unter Verwendung des Spinnennetzverfahrens [TJW16]

- Fibonacci-Strukturen als Systemdesignmuster

Das platzsparende Design der Fibonacci Spirale, welche auch goldene Spirale genannt wird, ist häufig im Tierreich anzutreffen [TW13]. Zum Beispiel einige Kopffüßler (*Cephalopoda*), im Speziellen das Perlboot (*Nautilus macromphalus*) erbauen sich ihre Schale mit derselben mathematischen Präzision wie eine Fibonacci-Spirale (vgl. Abbildung 5 oben). Wenn das Perlboot heranwächst, schafft es neue, größere Kammern und bewegt den Körper in den größeren Raum. Der frei gemachte Raum wird nun mit einer Wand versiegelt. Die Kammerbereiche werden durch die Wände (Septen) abgegrenzt, von denen jede in der Mitte durch einen Kanal, den Siphon, durchstoßen wird. Der Siphon ist röhrenförmig und verläuft zentral durch die Kammern in der Schale des Nautilus und ist essenziell um Auftrieb und Bewegung zu steuern [SL10]. Die auf die vorliegende Problemstellung bezogene Analogie war folgende: nämlich, dass Fabriklayouts gemäß Fibonacci-Spiralen geplant werden bzw. dass sie gemäß dieser Strategie wachsen und expandieren. Ein Transportweg, ebenfalls in Form einer Spirale, wird analog zur biologischen Aussenschale angelegt. In Abbildung 5 (unten) ist die Anwendung dieser Analogie auf Fabrik C zu sehen. Die detaillierte Vorgehensweise des Verfahrens wird im Beitrag [TJW16] näher erläutert.

#### 4 GEGENÜBERSTELLUNG DER ERGEBNISSE DER KLASSISCH UND BIO-INSPIRIERT ERZEUGTEN LAYOUTS

In den beiden vorangegangenen Unterkapiteln wurde nur kurz auf einige ausgewählte klassisch und bio-inspiriert erzeugten Layoutvarianten eingegangen. Abbildung 6 zeigt die Resultate aller 24 untersuchten Layoutvarianten, als auch die bewerteten Kriterien im Überblick. An den Ergebnissen ist erkennbar, dass es nicht „die“ beste Methode gibt, sondern dass der Fabrikstyp einen wesentlichen Einfluss darauf hat, ob eine Methode zu guten oder schlechten Resultaten führt. Außerdem zeigt die Abbildung 6 auch, dass das Fibonacci Doppelspiralen Verfahren mit 6,65 Gesamtpunkten (gewichteter Gesamtnutzen) als Gewinner in allen Layoutvarianten innerhalb der drei analysierten Fabriken hervorgeht. Die Ergebnisse in Hinblick auf den Materialfluss zeigen, dass einige klassische Methoden, wenn auch zum Teil vor Jahrzehnten entwickelt, immer noch sehr praxistauglich sind. Doch bei komplexeren nichtlinearen Materialflüssen wie in der Fabrik C können bio-inspirierte Ansätze ihre Stärken zeigen. Auch in der Kategorie Veränderungsfähigkeit können die bio-inspirierten Verfahren besonders punkten und die klassischen Verfahren durchwegs in den Schatten stellen. Doch in der Kategorie Planungsaufwand können die bio-inspirierten Verfahren aufgrund der komplexeren Herangehensweise und dem damit einhergehenden Mehraufwand nicht den ersten Platz einnehmen.

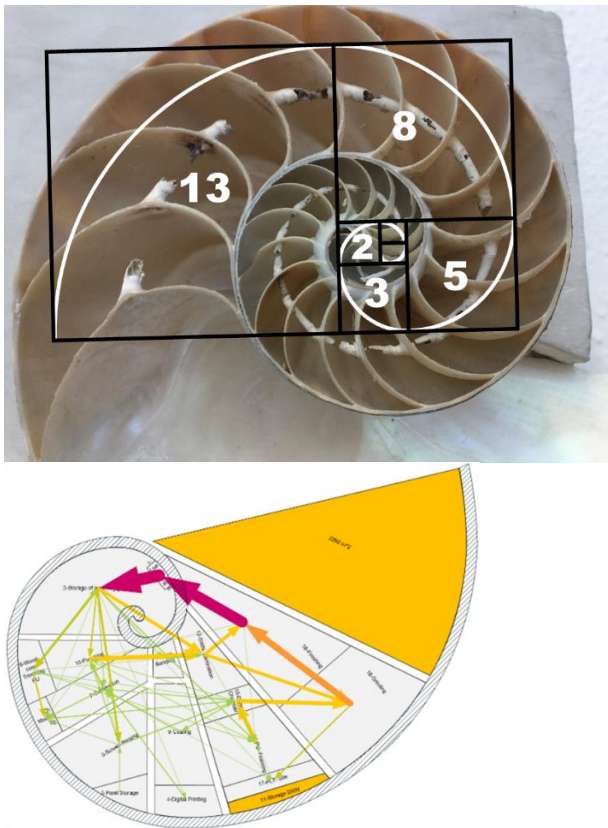


Abbildung 5. (oben): Fibonacci-Spirale in der Natur (*Nautilus macromphalus*); (unten): bionisch inspiriertes Fabriklayout von Fabrik C unter Verwendung des Fibonacci Einfachspiralen Verfahrens [TJW16].

## 5 FAZIT

Bionik in der Logistik - Träumerei oder umsetzbares Potential? Die Idee Fabriken wie Bienenwaben, Spinnennetze oder die Nautilus-Schale zu gestalten, mag im ersten Moment weit hergeholt erscheinen und nach Science-Fiction oder Zukunftsmusik klingen. Doch wie die Herangehensweise bei realen Fabrikplanungsprojekten zeigt, werden im

Rahmen der Idealplanung zunächst verschiedene Varianten von Layouts erarbeitet, wobei technische und wirtschaftliche Einschränkungen sowie äußere Restriktionen noch nicht beachtet werden. In erster Linie stehen hier nur funktionelle Beziehungen der Funktionsbereiche und deren optimale Anordnung im Hinblick auf die Produktion im Mittelpunkt [KSG84]. Ob das erzeugte Layout nun rechteckig, rund, spiralförmig oder anders aussieht, ist in dieser Phase gegenstandslos. Erst in der Realplanung werden die Restriktionen wieder schrittweise eingeblendet und es wird versucht das entwickelte Ideallayout so anzupassen, dass alle Restriktionen erfüllt werden können ohne die grundsätzlichen Intentionen und Einsparungspotentiale des Ideallayouts negativ zu beeinflussen. Wie im Teil 3 diskutiert und anhand der Ergebnisse der Multikriterienbewertung (Abbildung 6) nachgewiesen wurde, sind die gefundenen biologischen Systemdesignmuster in der Lage eine vorhandene Layoutsituation zu verbessern. Außerdem haben drei der vier biologischen Vorgehensweisen eine bessere Gesamtbewertung als die untersuchten klassischen Verfahren der Layoutplanung. Das neu arrangiert Layout der Fabrik C unter Verwendung des Fibonacci Doppelspiralen Verfahrens konnte die Transportleistungsziffer des Originallayouts um 43,5% reduzieren. Und wenn folgende Annahme von Tompkins und White wahr ist, dann kann sich der Aufwand in Zukunft lohnen biologisch inspirierte Fabriklayouts zu bauen: „Es wurde geschätzt, dass zwischen 20% und 50% der gesamten Betriebsausgaben innerhalb der Produktion dem Materialhandhabungskosten zuzuordnen sind. Effektive Fabriklayoutplanung kann diese Kosten mindestens zwischen 10% und 30% reduzieren und daneben auch die Produktivität erhöhen“<sup>2</sup> ([TW84], S. 5).

## DANKSAGUNG

Dieser Beitrag wurde unterstützt durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG – Bridge Early Stage [851267] und durch die Technische Universität Graz - Initial Funding Program [F-AF2-309-01].

<sup>2</sup> Übersetzung des Verfassers; Original in Englisch: „It had been estimated that between 20% to 50% of the total operating expenses within manufacturing are attributed to material handling.

Effective facilities planning can reduce these costs by at least 10% to 30% and thus increase productivity.“

Kriteriumsabkürzung Messskala Gewichtung Gewichtung des Subkriteriums	Materialfluss Layoutbezogen				Flächenbedarf Layoutbezogen				Planungsaufwand Methodenbezogen				Veränderungsfähigkeit Layoutbezogen				Gesamt				
	K1 metrisch		K2 metrisch		K3 metrisch		K4 ordinal		K5 ordinal		K6 ordinal		K7 ordinal		K8 ordinal						
	Transportleistung	Einsparung in %	Bewertung	gewichteter Teilnutzen	Netzfäche in m <sup>2</sup>	Einsparung in %	Bewertung	Rechteckfläche in m <sup>2</sup>	Einsparung in %	Bewertung	gewichteter Teilnutzen	Veränderungen bedarf	Flächenform-Veränderungen	Komplexität	Bewertung	gewichteter Teilnutzen		Flexibilität	Veränderungsfähigkeit	Bewertung	gewichteter Teilnutzen
<b>Varianten der Fabrik A</b>																					
original Layout	26.894.698			17.198				30.259													
Dreiecksverfahren	10.301.192	61,7%	8,8	20.393	-18,6%	0,0	33.180	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Reihenfolgeverbesserung	11.194.350	58,4%	8,3	10.173	40,8%	10,0	18.201	10,0	10,0	10,0	10,0	8,5	1,7	5,0	10,0	10,0	8,5	1,7	0,0	0,0	0,0
Kreisverfahren	8.073.362	70,0%	10,0	4,0	25.488	-48,2%	0,0	35.834	0,0	0,0	0,0	9,0	1,8	10,0	10,0	7,5	9,0	1,8	2,5	2,5	2,5
Fibonacci Einfachspiralen Verfahren	12.846.882	52,2%	7,5	3,0	15.080	12,3%	3,0	22.825	24,6%	6,2	4,6	0,9	0,0	10,0	0,0	5,0	5,0	1,0	5,0	5,0	5,0
Fibonacci Doppelspiralen Verfahren	9.189.692	65,8%	9,4	3,8	16.167	6,0%	1,5	25.064	17,2%	4,3	2,9	0,6	10,0	0,0	5,0	5,0	1,0	7,5	7,5	1,5	6,8
Spinnennetz Verfahren	10.795.457	59,9%	8,6	3,4	21.280	-23,7%	0,0	35.316	-16,7%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,0	2,5	2,5	0,5	10,0	10,0	2,0
Bienenwaben Verfahren	19.864.885	26,1%	3,7	1,5	15.403	10,4%	2,6	26.584	12,1%	3,0	2,8	0,6	10,0	0,0	5,0	2,5	2,5	0,5	10,0	10,0	2,0
min / max Werte -> 70,0% 10,0																					
<b>Varianten der Fabrik B</b>																					
original Layout	135.820			4.353				6.024													
Dreiecksverfahren	118.288	12,9%	2,6	1,1	7.094	-63,0%	0,0	12.672	-110,4%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Reihenfolgeverbesserung	115.268	15,1%	3,1	1,2	4.154	4,6%	9,6	7.871	-30,7%	0,0	4,8	1,0	5,0	10,0	10,0	8,5	1,7	0,0	0,0	0,0	0,0
Kreisverfahren	69.620	48,7%	10,0	4,0	6.199	-42,4%	0,0	9.115	-51,3%	0,0	0,0	0,0	10,0	10,0	7,5	9,0	1,8	2,5	2,5	2,5	2,5
Fibonacci Einfachspiralen Verfahren	79.373	41,6%	8,5	3,4	4.146	4,8%	10,0	5.916	1,8%	10,0	10,0	2,0	10,0	0,0	5,0	5,0	1,0	5,0	5,0	5,0	1,0
Fibonacci Doppelspiralen Verfahren	77.436	43,0%	8,8	3,5	4.645	-6,7%	0,0	6.402	-6,3%	0,0	0,0	0,0	10,0	0,0	5,0	5,0	1,0	7,5	7,5	7,5	1,5
Spinnennetz Verfahren	75.431	44,5%	9,1	3,6	4.616	-6,1%	0,0	7.177	-19,2%	0,0	0,0	0,0	10,0	0,0	5,0	2,5	2,5	0,5	10,0	10,0	2,0
Bienenwaben Verfahren	89.658	34,0%	7,0	2,8	4.251	2,3%	4,9	7.042	-16,9%	0,0	2,5	0,5	10,0	0,0	5,0	2,5	2,5	0,5	10,0	10,0	2,0
min / max Werte -> 48,7% 10,0																					
<b>Varianten der Fabrik C</b>																					
original Layout	1.370.960			5.843				9.507													
Dreiecksverfahren	961.164	29,9%	6,9	2,8	7.415	-26,9%	0,0	10.188	-7,2%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Reihenfolgeverbesserung	1.984.036	-44,7%	0,0	0,0	4.564	21,9%	10,0	7.041	25,9%	10,0	10,0	2,0	5,0	10,0	10,0	8,5	1,7	0,0	0,0	0,0	0,0
Kreisverfahren	1.116.494	18,6%	4,3	1,7	11.170	-91,2%	0,0	16.033	-68,7%	0,0	0,0	0,0	10,0	10,0	7,5	9,0	1,8	2,5	2,5	2,5	2,5
Fibonacci Einfachspiralen Verfahren	1.040.830	24,1%	5,5	2,2	5.003	14,4%	6,6	7.661	19,4%	7,5	7,0	1,4	10,0	0,0	5,0	5,0	1,0	5,0	5,0	5,0	1,0
Fibonacci Doppelspiralen Verfahren	775.233	43,5%	10,0	4,0	5.115	12,5%	5,7	10.017	-5,4%	0,0	2,8	0,6	10,0	0,0	5,0	5,0	1,0	7,5	7,5	7,5	1,5
Spinnennetz Verfahren	1.023.839	25,3%	5,8	2,3	6.247	-6,9%	0,0	11.740	-23,5%	0,0	0,0	0,0	10,0	0,0	5,0	2,5	2,5	0,5	10,0	10,0	2,0
Bienenwaben Verfahren	1.064.562	22,3%	5,1	2,1	5.507	5,8%	2,6	8.167	14,1%	5,4	4,0	0,8	10,0	0,0	5,0	2,5	2,5	0,5	10,0	10,0	2,0
min / max Werte -> 43,5% 10,0																					

**Erfüllung des Bewertungskriteriums**  
 sehr hoch ● 10  
 hoch ● 7,5  
 mittel ● 5  
 gering ● 2,5  
 sehr gering ○ 0

**LEGENDE**  
 original Layout  
 klassische Varianten  
 bionische Varianten

**GESAMTERGEBNIS**

Dreiecksverfahren	Punkte	4,45
Reihenfolgeverbesserung	Punkte	4,88
Kreisverfahren	Punkte	5,54
Fibonacci Einfachspiralen Verfahren	Punkte	6,31
Fibonacci Doppelspiralen Verfahren	Punkte	6,65
Spinnennetz Verfahren	Punkte	5,63
Bienenwaben Verfahren	Punkte	5,23

Abbildung 6. Multikriterienbewertung für die untersuchten Fabriklayouts welche sowohl mit klassischen als auch bio-inspirierten Layoutplanungsmethoden erzeugt wurden

**LITERATURVERZEICHNIS**

- [AF09] Arnold, D.; Furmans, K.: Materialfluss in Logistiksystemen. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2009. ISBN:9783642014048.
- [Bal14] Ball, R.: Bibliometrie. Einfach, verständlich, nachvollziehbar. Walter de Gruyter GmbH, Berlin/Boston, 2014. ISBN:978-3-11-029375-3.
- [Bie40] Bierens de Haan, J. A.: Die tierischen Instinkte und ihr Umbau durch Erfahrung. Eine Einführung in die allgemeine Tierpsychologie. Brill, Leiden, 1940.
- [BM08] Blum, C.; Merkle, D. Hrsg.: Swarm intelligence. Introduction and applications. Springer, Berlin u.a., 2008. ISBN:3-540-74088-0.
- [BM91] Bushnell, D. M.; Moore, K. J.: Drag reduction in nature. In Annual Review of Fluid Mechanics, 1991, 23; S. 65–79.
- [BN97] Barthlott, W.; Neinhuis, C.: Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces. In Planta, 1997, 202; S. 1–8.
- [BT05] Ball, R.; Tunger, D.: Bibliometrische Analysen - Daten, Fakten und Methoden. Grundwissen Bibliometrie für Wissenschaftler, Wissenschaftsmanager, Forschungseinrichtungen und Hochschulen. Forschungszentrum Jülich, Jülich, 2005.
- [Dal08] Dalton, S.: Spiders. The ultimate predators. A & C Black, London, 2008. ISBN:1408106973.
- [Foe11] Foelix, R. F.: Biology of spiders. Oxford Univ. Press, Oxford, 2011. ISBN:9780199734825.
- [Fri27] Frisch, K.: Aus dem Leben der Bienen. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1927. ISBN:9783662306864.
- [Gla14] Glaeser, G.: Geometrie und ihre Anwendungen in Kunst, Natur und Technik. Springer Spektrum, Berlin, 2014. ISBN:9783642418518.
- [GPP+07] Gleich, A. v. et al.: Bionik. Aktuelle Trends und zukünftige Potenziale ; 18 Tabellen. Univ. Bremen Fachbereich 4 Produktionstechnik, Bremen, 2007. ISBN:9783932092862.
- [HMR10] Helbing, K. W.; Mund, H.; Reichel, M.: Handbuch Fabrikprojektierung. Springer, Berlin, 2010. ISBN:9783642016189.
- [KSG84] Kettner, H.; Schmidt, J.; Greim, H.-R.: Leitfaden der systematischen Fabrikplanung. Hanser, München, 1984.
- [MM73] Muther, R.; Mogensen, A. H.: Systematic layout planning. CBI Publ. Co, Boston, Mass., 1973. ISBN:0843608145.
- [MMS+07] Müller, F. et al.: Self-Cleaning Surfaces Using the Lotus Effect: Handbook for Cleaning/Decontamination of Surfaces, 2007; S. 791–811. ISBN: 9780444516640.
- [PHR+04] Pirk, C. W. et al.: Honeybee combs. Construction through a liquid equilibrium process? In Naturwissenschaften, 2004, 91; S. 350–353.
- [RGM+09] Ripon, K. S. et al.: Pareto optimal based evolutionary approach for solving multi-objective facility layout problem: Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 2009; S. 159–168. ISBN: 364210682X.
- [Sch70] Schmigalla, H.: Methoden zur optimalen Maschinenanordnung. Verl. Technik, Berlin, 1970.
- [SL10] Saunders, W.B.; Landman, N.H. Hrsg.: Nautilus. The Biology and Paleobiology of a Living Fossil. Springer Netherland, Dordrecht, 2010. ISBN:9789048132980.
- [Szp11] Szpiro, G. G.: Die Keplersche Vermutung. Wie Mathematiker ein 400 Jahre altes Rätsel lösten. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2011. ISBN:9783642127403.
- [TJW16] Tinello, D.; Jodin, D.; Winkler, H.: Biomimetics applied to factory layout planning. Fibonacci based patterns, spider webs and nautilus shell as bio-inspiration to reduce internal transport costs in factories. In CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2016, 13; S. 51–71.
- [TKJ+17] Tinello, D. et al.: Study of biomimetics applied to logistics, material handling, SCM and manufacturing. A bibliometric analysis (1990-2013). In Logistics Journal, 2017, 2017; S. 1–15.
- [TTJ12] Tinello, D.; Trummer, W.; Jodin, D.: Efficient approach in modifying material flow systems. In (Bošnjak, S. Hrsg.): XX International Conference on "Material Handling, Constructions and Logistics", MHCL '12, 3 - 5 October 2012, University of Belgrade,



Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, Serbia, 2012; S. 243–246. ISBN: 9788670837638.

- [TW13] Tinello, D.; Winkler, H.: Bionik in der Logistik - Träumerei oder umsetzbares Potential? In (Zsifkovits, H. E.; Altendorfer, S. Hrsg.): Logistics Systems Engineering. 1. Wissenschaftlicher Industrielogistik-Dialog in Leoben. Rainer Hampp Verlag, München, 2013; S. 19–31. ISBN: 9783866188587.
- [TW84] Tompkins, J. A.; White, J. A.: Facilities Planning. Wiley, New York, 1984. ISBN:0471032999.
- [TWG+17] Tinello, D. et al.: BioFacLay. Bio-inspired Factory Layouts for Optimal Material Flow. <http://www.biofacalay.info/>.
- [TWJ+15] Tinello, D. et al.: Biomimetics applied to factory layout planning: honeycombs as bio-inspiration to reduce internal transport costs in factories. In (Kartnig, G.; Zrnić, N.; Bošnjak, S. Hrsg.): XXI International Conference on "Material Handling, Constructions and Logistics". 23rd – 25th September, 2015 MHCL '15. University of Belgrade Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, 2015; S. 161–164. ISBN: 9788670838635.
- [VDI08] VDI: Vorgehen bei einer Materialflußplanung. VDI 2498 Blatt 2. VDI-Verl., Düsseldorf, 2008.
- [VDI99] VDI: Methoden zur materialflußgerechten Zuordnung von Betriebsbereichen und -mitteln. VDI 3595. Beuth, Berlin, 1999.
- [Wro05] Wrona, T. Hrsg.: Die Fallstudienanalyse als wissenschaftliche Forschungsmethode. ESCP-EAP, Berlin, 2005.

---

**Ing. Mag. Daniel Tinello**, Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Technische Logistik (ITL), Technische Universität Graz.

Adresse: Institut für Technische Logistik, Inffeldgasse 25/E, 8010 Graz (Österreich)  
Tel.: +43 (0)316 873 7327  
E-Mail: [daniel.tinello@tugraz.at](mailto:daniel.tinello@tugraz.at)

**Univ.-Prof. Dr. habil. Herwig Winkler**, Lehrstuhlinhaber des Lehrstuhls für Produktionswirtschaft an der Brandenburgischen Technische Universität Cottbus-Senftenberg (BTU)

Adresse: Lehrstuhl für Produktionswirtschaft, Siemens-Halske-Ring 6, 03046 Cottbus  
Tel.: +49 (0)355 69 4120  
E-Mail: [winkler@b-tu.de](mailto:winkler@b-tu.de)

