

Diss. ETH No. 18182

# Dynamic R&D Networks

The Efficiency and Evolution of Interfirm Collaboration Networks.

A dissertation submitted to the  
ETH ZURICH

for the degree of  
DOCTOR OF SCIENCES

presented by  
MICHAEL DAVID KÖNIG  
Diplom-Ingenieur, Technische Universität Wien  
born 19. March 1980  
citizen of Austria

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. Dr. Frank Schweitzer, examiner  
Prof. Dr. Francis Bloch, co-examiner

2009

**Abstract** A nation's competitive advantage hinges on the capacity of its economy to innovate and the efficiency of its efforts in research and development (R&D) (Porter, 1990). High wage countries such as Switzerland are particularly affected by the pressure to develop new products and technologies both fast and efficiently in order to sustain their standard of living. Moreover, as we observe a growing complexity in the technologies used for production and innovation, firms increasingly discover that their in-house innovative capabilities are insufficient for developing these technologies (Rivkin, 2000). Thus firms gather knowledge from other firms through R&D collaborations (Cowan and Jonard, 2004; Sorenson et al., 2006). However, as long as the underlying mechanisms that govern the innovation process, the formation of R&D collaborations and the efficiency of the resulting economy are not sufficiently understood, policy makers and society as a whole incur the risk of getting locked into inefficient states, leading to a loss of competitiveness in the rapidly changing global economy.

The work contained herein contributes to reducing this risk by increasing our understanding of the efficiency and evolution of R&D networks. For this purpose, a new model to investigate the efficiency and evolution of networks of firms exchanging knowledge in R&D partnerships is developed. We examine the efficiency of a given network structure in terms of maximizing aggregate profits in the economy. We show that the efficient network structure depends on the marginal cost of collaboration and the volatility of the technological environment. When the marginal cost is low, the complete graph is efficient. However, high marginal cost implies that the efficient network is sparser and has a core-periphery structure. Next, we examine the evolution of the network structure under alternative scenarios, assuming that the decision on collaborating partners is decentralized.

First, we assume that the formation of links follows a dynamic process in which firms are stochastically selected to revise their collaboration strategies. In these dynamics, firms decide to form a link if the link did not exist before and the link is beneficial to both of them, and decide to delete a link if the link existed before and deletion is beneficial to at least one of them (Jackson and Watts, 2002). We show the existence of multiple equilibrium structures, most of them being inefficient. This is due to the path dependent character of the partner selection process, the presence of knowledge externalities and the presence of severance costs involved in link deletion. We study the properties of the emerging equilibrium networks and we show that they are coherent with the stylized facts of R&D networks.

Second, we analyze a dynamic link formation process in which alliances are formed between firms with high knowledge levels (technological leaders (Powell et al., 1996a)) while the volatile environment introduces interruptions in the connections between firms leading

to the breakdown of some collaborations. We incorporate the idea of bounded rational decision making (Aumann, 1997; Simon, 1953) by restricting the search for new collaboration partners to the neighbors of the neighbors of a firm (Gulati, 1995; Jackson and Rogers, 2007). The volatile environment causes existing links to decay where those links that firms value less than others are more likely to be affected by the decay. We show analytically that there exist stationary networks and that their topological properties match with those of empirical R&D networks. In particular, we find a strong core-periphery structure (due to the presence of inter-linked stars (Goyal and Joshi, 2003)) observed in empirical studies (Baker et al., 2008). We show that the relative size of the core compared to the periphery critically depends on the linking opportunities of firms and the strength of the link decay. Moreover, there exists a sharp transition in efficiency and network density from highly centralized to decentralized networks.

For all dynamic processes governing the formation of links between firms studied in this thesis a tension between efficiency and stability exists. If firms myopically pursue the maximization of profits in an uncertain technological environment or marginal costs of collaboration are high enough, the economy can get locked into inefficient equilibria. Thus, we show that the risks inherent in innovation driven markets are not only present in the uncertain outcomes of firms' R&D investments but also in the possibility of inefficient network structures emerging from the R&D partner choices of firms.

**Kurzfassung** Die Wettbewerbsfähigkeit und der kompetitive Vorteil einer Ökonomie hängen kritisch von ihrer Fähigkeit ab, Innovationen zu generieren und ihre Forschungs- und Entwicklungsausgaben effizient einzusetzen (Porter, 1990). Hochlohnländer wie die Schweiz sind besonders von diesem Druck betroffen, neue Produkte und Technologien schnell und effizient zu entwickeln, um im globalen Wettbewerb bestehen zu können und ihren Lebensstandard zu sichern. Hinzu kommt, dass die wachsende Komplexität von Produktionstechnologien die Möglichkeiten von Firmen immer weiter beschränkt, Innovationen selbständig zu entwickeln (Rivkin, 2000). Daher neigen Firmen vermehrt dazu, sich das nötige Wissen von anderen Firmen durch Forschungskollaborationen anzueignen (Cowan and Jonard, 2004; Sorenson et al., 2006). So lange aber die zugrundeliegenden Mechanismen, die den Innovationsprozess, die Bildung von Forschungskollaborationen und die Effizienz der daraus entstehenden Netzwerkstrukturen bestimmen, nicht ausreichend verstanden worden sind, besteht für politische Entscheidungsträger wie auch für die gesamte Gesellschaft das Risiko einer ineffizienten Ökonomie und dem damit verbundenen Verlust der Wettbewerbsfähigkeit in der sich rapide verändernden globalen Ökonomie.

Die vorliegende Dissertation hat sich zum Ziel gesetzt, dieses Risiko zu verringern, indem sie unser Verständnis der Effizienz und der Entstehung von Forschungs- und Entwicklungs- (F&E) Kollaborationen und den sich daraus ergebenden Netzwerken verbessern möchte. Zu diesem Zweck wird ein neues Modell entwickelt, das es ermöglichen soll, die Evolution und Effizienz von Netzwerken bestehend aus Firmen, die durch F&E-Kollaborationen Wissen austauschen, zu untersuchen. Basierend auf diesem Modell betrachten wir zunächst die Effizienz einer gegebenen Netzwerkstruktur im Sinne der Maximierung des aggregierten Profits der Ökonomie. Wir zeigen, dass die effiziente Netzwerkstruktur von den marginalen Kosten einer Kollaboration und der Volatilität des technologischen Umfelds abhängt. Wenn die marginalen Kosten niedrig sind, dann ist das vollständige Netzwerk, in dem alle möglichen Kollaborationen bestehen, effizient. Hingegen implizieren hohe marginale Kosten, dass das effiziente Netzwerk weniger Kollaborationen enthält und eine Kern-Peripherie Struktur aufweist. Im nächsten Schritt untersuchen wir die Evolution der Netzwerkstruktur, wobei wir annehmen, dass die Entstehung von F&E-Kollaborationen dezentral organisiert ist.

Zunächst betrachten wir den Fall, dass die Entstehung von Kollaborationen in dem F&E-Netzwerk einem dynamischen Prozess folgt, in dem Firmen zufällig ausgewählt werden, um ihre Kollaborationsstrategien revidieren zu können. Dies bedeutet, dass Firmen entscheiden, ob sie eine Kollaboration eingehen, wenn sie noch nicht besteht oder eine Kollaboration beenden, wenn sie bereits besteht. Ersteres findet nur dann statt, wenn beide Firmen davon profitieren, während letzteres dann stattfindet, wenn zumindest eine der Firmen davon profitiert (Jackson and Watts, 2002). Wir zeigen, dass unter diesen Annah-

men multiplen Gleichgewichtstrukturen existieren, wobei die meisten davon ineffizient sind. Der Grund dafür stammt von der starken Pfadabhängigkeit des Partnerauswahlprozesses, der Präsenz von Wissensexternalitäten und möglichen Trennungszahlungen, die beim Beenden einer Kollaboration entstehen können. Darüber hinaus untersuchen wir die Eigenschaften der emergenten Gleichgewichtsnetzwerke und zeigen, dass diese mit den stilisierten Fakten empirischer F&E-Netzwerke übereinstimmen.

Im Folgenden analysieren wir einen dynamischen Netzwerkformierungsprozess, in dem Allianzen zwischen Firmen mit einem hohen technologischen Wissensgrad geschlossen werden (Powell et al., 1996a), während ein volatiles Umfeld Störungen in den Kollaborationen zwischen Firmen einführt, die zu deren Zusammenbruch führen können. Wir berücksichtigen das Konzept der begrenzten Rationalität (Aumann, 1997; Simon, 1953), indem wir die Suche nach neuen Kollaborationspartnern auf die Nachbarschaft der aktuellen Partner einschränken (Gulati, 1995; Jackson and Rogers, 2007). Das volatile Umfeld führt dazu, dass bereits bestehende Kollaborationen zerfallen, wobei diejenigen Kollaborationen, die für Firmen weniger wertvoll sind als andere, mit einer höheren Wahrscheinlichkeit zerfallen. Wir zeigen analytisch, dass stationäre Netzwerke existieren und dass ihre topologischen Eigenschaften mit denen von empirischen F&E-Netzwerken übereinstimmen. Insbesondere finden wir eine starke Kern-Peripherie Struktur, die bereits in früheren empirischen Studien nachgewiesen wurde (Baker et al., 2008). Wir zeigen, dass die relative Grösse des Kerns im Vergleich zur Peripherie kritisch von den Kollaborationsmöglichkeiten und der Stärke der Volatilität des Umfelds abhängt. Darüber hinaus zeigen wir, dass das volatile Umfeld einen scharfen Übergang sowohl in der Effizienz als auch in der Netzwerkdicke von stark zentralisierten zu denzentralisierten Netzwerken induziert.

Für alle dynamischen Prozesse, die die Entstehung von Kollaborationen zwischen Firmen bestimmen, besteht eine Inkongruenz zwischen Effizienz und Stabilität. Wenn Firmen in einem volatilen Umfeld kurzfristig die Maximierung ihres Profits verfolgen oder wenn die marginalen Kosten einer Kollaboration hoch genug sind, dann können ineffiziente Gleichgewichte entstehen. Damit wird klar, dass innovationsgetriebenen Märkte einem doppelten Risiko ausgesetzt sind: Zum Einen betrifft dieses Risiko die unsicheren Ergebnisse von F&E-Investitionen. Zum Anderen betrifft es aber auch die Möglichkeit der Entstehung einer ineffizienten Netzwerkstruktur, die sich aus der Partnerwahl der Firmen unter Unsicherheit mit beschränkter Information ergeben kann.