



Gert Schneider (Autor)

**Automatische Formbestimmung einzelner  
strömungskräftefreier Erythrozyten durch  
Auswertung von Intensitätsbildern defokussierter  
mikroskopischer Aufnahmen**

Gert Schneider

---

**Automatische Formbestimmung einzelner  
strömungskräftefreier Erythrozyten  
durch Auswertung von Intensitätsbildern  
defokussierter mikroskopischer Aufnahmen**

---



Cuvillier Verlag Göttingen

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/4917>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,  
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>

---

## 2. Die Form des Erythrozyten und seine Bedeutung

### 2.1. Aufbau und Ruheformspektrum

Das rote Blutkörperchen, im Englischen als Erythrocyte oder Red Blood Cell bezeichnet, nimmt eine Sonderstellung unter den Zellen des menschlichen Körpers ein: Neben seiner freien Beweglichkeit ohne Zellverband ist sein Aufbau ohne Zellkern und sonstige Zellorganellen auffällig. Es besteht aus der umhüllenden Membran und dem Zytosol, dessen Hauptbestandteil Hämoglobin ist. Dieser einfache Aufbau und eine relativ leichte Verfügbarkeit prädestinieren den Erythrozyten als Objekt für Membranuntersuchungen.

Der Lipidbilayer ist das Grundgerüst der Erythrozytenmembran mit einer Dicke von ca. 4 nm, bestehend aus Phospholipidmolekülen und Cholesterin, wobei nur die hydrophilen Kopfgruppen mit der umgebenden Flüssigkeit in Berührung kommen. Es sind ca. 400 unterschiedliche Phospholipidgruppen bekannt, die am Aufbau von biologischen Membranen beteiligt sind. Sie liegen asymmetrisch verteilt in den beiden Lipidschichten des Bilayers.

Die Glycokalix ragt in das äußere Medium hinein, d.h. in die Suspension oder in das Serum. Sie besitzt eine negative Nettoladung infolge von Sialinsäureresten, die unter physiologischen Bedingungen vollkommen dissoziiert sind. Auf diese Weise entsteht ein Oberflächenpotential. Diese Ladungen bestimmen zusammen mit den Dipoleigenschaften der hydrophilen Anteile der Phospholipide die elektrostatischen Eigenschaften der äußeren Membranoberfläche. Sie lassen sich mit Einschränkungen als eine kontinuierliche Oberflächenladung der Membran beschreiben.

Das Zytoskeletton befindet sich an der Membraninnenseite. Es besteht hauptsächlich aus Proteinen, Spektrin und Aktin, die über verschiedene Bindungsproteine an die integralen Proteine der Membran geknüpft sind.

Der Erythrozyt entsteht über das Zwischenstadium des Retikulozyten im roten Knochenmark. Dabei entwickelt sich aus der unregelmäßig globulären Form unter Abnahme des Volumen-Oberflächenverhältnisses die typische symmetrische diskozytische Normalform des Erythrozyten [Bes77].

Voraussetzung für diese Form ist ein Oberflächenüberschuß, der sich in einem erhöhten Oberflächen- Volumenverhältnis beim Erythrozyten (ca.  $1,4 \mu\text{m}^2/\mu\text{m}^3$ ) gegenüber einer volu-

mengleichen Kugel (ca.  $1 \mu\text{m}^2/\mu\text{m}^3$ ) ausdrückt [Eva70]. Wirken äußere Kräfte, z.B. Scherkräfte in Strömungen, auf den Erythrozyten ein, verändert dieser in Abhängigkeit der Belastung seine Form, schnell aber nach abruptem Stop der Strömung innerhalb kürzester Zeit (typisch 100 ms) in seine Ausgangsform zurück [Art88a, Art95b].

Ohne wesentliche Änderung des Volumen- Oberflächen- Verhältnisses kann der Erythrozyt seine Form in zwei verschiedene Richtungen ändern [Deu68]. Zum einen entwickeln sich auf seiner Oberfläche Vorwölbungen, die mit zunehmender Ausprägung der Formänderung an Anzahl zunehmen und deren Durchmesser sich immer weiter verkleinert. Die Endgestalt dieser als Echinozytose bezeichneten Formänderung ist nahezu kugelförmig. Andererseits bildet sich aus einer Eindellung des Erythrozyten eine immer tiefer werdende Einbuchtung der Membran aus, Stomatozytose genannt. Auch diese Änderung gipfelt in einer sphärischen Endform.

Diese beiden Arten der Formänderung wurden von BESSIS [Bes77] in Zwischenformen klassifiziert und als ein kontinuierliches Spektrum dargestellt.

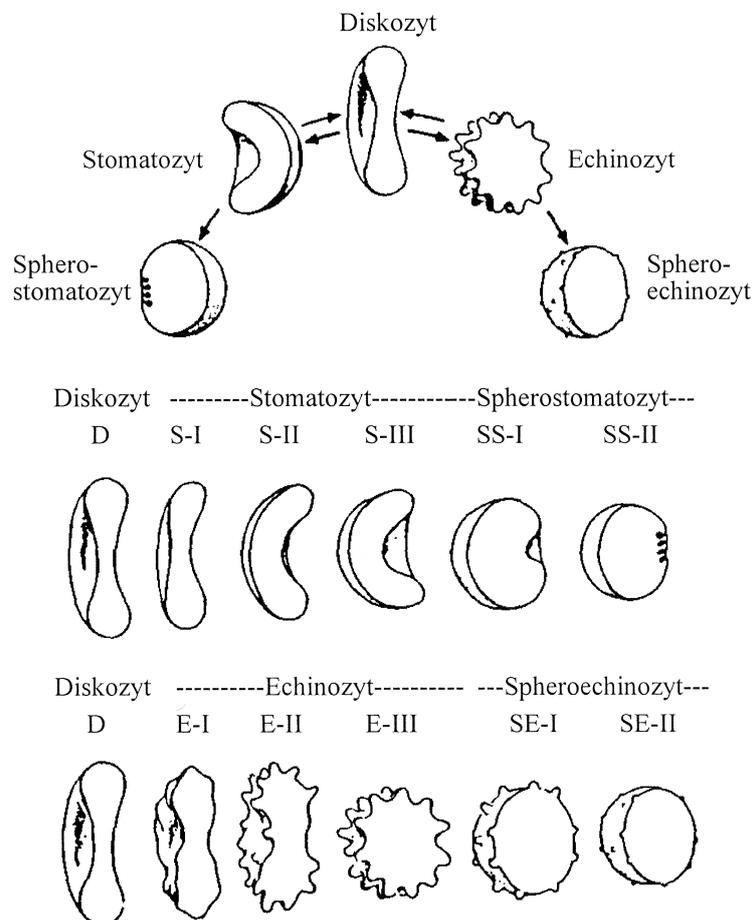


Abb. 2-1:

Ruheformklassifizierung nach BESSIS

Neben der in Abbildung 2-1 angegebenen Bezeichnung wird auch die Formcharakterisierung mittels Formindex verwendet. Die Tabelle 2-2 zeigt die Zuordnung zwischen BESSIS- Formbeschreibung und Formindex.

Form	SS-II	SS-I	S-III	S-II	S-I	D	E-I	E-II	E-III	SE-I	SE-II
Index	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5

Abb. 2-2:

*Zuordnung zwischen BESSIS- Klasseneinteilung und Formindex*

Andere Änderungen der Ruheform resultieren aus einer Änderung des Erythrozytenvolumens, z.B. hervorgerufen durch Änderung der Osmolarität.

## 2.2. Ruheform und Lipidbilayer

Schon bald, nachdem man Zellen unter dem Mikroskop betrachten konnte, wurde versucht, die charakteristische Ruheform des Erythrozyten zu erklären. So vermutete HALLER 1757 [Hal57], seine Form sei die Folge fortlaufender "Abschleifungsvorgänge" in den Gefäßen. So sehr diese naive Vorstellung heute belächelt wird, es herrscht bis heute keine restlose Klarheit über diese Formentstehung. Ausgehend von den histologischen Untersuchungen, die selbst im Elektronenmikroskop nur eine "gleichförmige granuläre Struktur" [Wal67] erkennen lassen, konnten bis jetzt nur Hypothesen über die Kräfte, die diese Form aufrechterhalten, aufgestellt werden.

Das "fluid mosaic"- Modell ist grundlegend für das heutige Verständnis vom Aufbau der Membran [She74], reicht aber nicht aus, die Ruheform des Erythrozyten und auftretende Formänderungen völlig zu erklären. Einigkeit herrscht darüber, daß die bikonkave Form ein Minimum der in der elastischen Membran gespeicherten Energie widerspiegelt [Can70]. In [Deu76] wird dafür als Ursache eine negative Vorkrümmung (Hervorwölbung der Innenseite) der Erythrozytenmembran postuliert, ohne daß dafür die physikalisch- chemischen Ursachen geklärt wären.

Aus dem Aufbau des Erythrozyten wird jedoch ersichtlich, daß die formgebenden und formstabilisierenden Eigenschaften im engsten Zusammenhang mit der Membran (Lipidbilayer und Zytoskeleton) zu suchen sind.

Eine teilweise Erklärung für die stomatozytische und echinozytische Formänderung lieferten SHEETZ und SINGER [She74] mit ihrer "bilayer couple"- Theorie, die davon ausgeht, daß sich die Form des Erythrozyten in Richtung Stomatozytose / Echinozytose durch Einlagerungen (Flächenänderung) von Molekülen an den inneren / äußeren Teil seiner Doppelmembran ändert. Dieses Erklärungsmodell wurde bezüglich der Rolle des unter der Doppelmembran liegenden Spektrinnetzes erweitert [Schmi83].