

Hämatologische Diagnostik

Leitlinie

Empfehlungen der Fachgesellschaft zur Diagnostik und Therapie hämatologischer und onkologischer Erkrankungen

Herausgeber

DGHO Deutsche Gesellschaft für Hämatologie und
Medizinische Onkologie e.V.
Alexanderplatz 1
10178 Berlin

Geschäftsführender Vorsitzender: Prof. Dr. med. Lorenz Trümper

Telefon: +49 (0)30 27 87 60 89 - 0
Telefax: +49 (0)30 27 87 60 89 - 18

info@dgho.de
www.dgho.de

Ansprechpartner

Prof. Dr. med. Bernhard Wörmann
Medizinischer Leiter

Quelle

www.onkopedia.com

Die Empfehlungen der DGHO für die Diagnostik und Therapie hämatologischer und onkologischer Erkrankungen entbinden die verantwortliche Ärztin / den verantwortlichen Arzt nicht davon, notwendige Diagnostik, Indikationen, Kontraindikationen und Dosierungen im Einzelfall zu überprüfen! Die DGHO übernimmt für Empfehlungen keine Gewähr.

Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung	2
2 Einleitung	2
3 Zytomorphologie	3
3.1 Indikationen	3
3.2 Methodischer Hintergrund	3
3.3 Präanalytik	3
3.4 Analytik	4
3.4.1 Peripheres Blut (Differenzialblutbild)	5
3.4.2 Knochenmark	5
3.5 Qualitätsstandards	6
4 Durchflusszytometrie	6
4.1 Indikationen	6
4.2 Methodischer Hintergrund	7
4.3 Präanalytik	7
4.4 Analytik	7
4.5 Qualitätsstandards	8
5 Zytogenetik	8
5.1 Indikationen	8
5.2 Methodischer Hintergrund	8
5.3 Präanalytik	9
5.4 Analytik	9
5.5 Qualitätsstandards	10
6 Molekulargenetik	10
6.1 Indikationen	10
6.2 Methodischer Hintergrund	10
6.3 Präanalytik	11
6.4 Analytik	11
6.5 Qualitätsstandards	12
7 Histopathologie (Knochenmark)	12
7.1 Indikationen	12
7.2 Methodischer Hintergrund	13
7.3 Präanalytik	13
7.4 Analytik	13
7.5 Qualitätsstandards	14
9 Literatur	14
15 Anschriften der Experten	15
16 Erklärung zu möglichen Interessenkonflikten	15

Hämatologische Diagnostik

Stand: Mai 2018

Erstellung der Leitlinie:

- [Regelwerk](#)
- [Interessenkonflikte](#)

Autoren: Karl-Anton Kreuzer, Peter Bettelheim, Torsten Haferlach, Andreas Rosenwald

1 Zusammenfassung

Die hämatologische Diagnostik umfasst die korrekte Feststellung der übergeordneten Entität nach der derzeit international gültigen Klassifikation, eine möglichst genaue Subtypisierung, die Bestimmung prognostisch relevanter und prädiktiver Parameter, die Überwachung des Therapieansprechens sowie die Charakterisierung von erworbener Therapieresistenz.

Die nachfolgenden Ausführungen sollen den Anwendern der verschiedenen diagnostischen Verfahren kurz die derzeit gültigen Standards darlegen und den behandelnden Kolleginnen und Kollegen die Möglichkeiten und Grenzen dieser Laborinformationen skizzieren.

2 Einleitung

Eine akkurate Diagnose ist unabdingbare Voraussetzung für eine sachgerechte Therapieentscheidung in der Hämatologie. Hierzu zählt nicht nur die korrekte Feststellung der übergeordneten Entität nach der derzeit gültigen WHO-Klassifikation [16], sondern auch eine möglichst genaue Subtypisierung. Denn auch letztere kann wiederum einen wichtigen Einfluss auf die Behandlungsstrategie nehmen.

Darüber hinaus muss insbesondere vor dem Einsatz zielgerichteter Therapien sichergestellt werden, dass die biologische Zielstruktur auf oder in den betreffenden Zellen vorhanden ist (z.B. CD20, CD30, CD52, *BCR-ABL1*, *JAK2 V617F*, *PML-RARA*).

Ein weiteres sehr wichtiges Einsatzgebiet der hämatologischen Diagnostik ist es, Prognoseparameter für die einzelnen Erkrankungen zu liefern. So kann sich etwa die Behandlung innerhalb einer Entität erheblich auf Grund dieser Information ändern (z.B. *TP53*-Mutationen bei der chronischen lymphatischen Leukämie). Dies gilt nicht nur für die initiale Befunderhebung, sondern auch während des Krankheitsverlaufes, da mittlerweile eine Reihe von Mechanismen bekannt ist, die eine erworbene Therapieresistenz zur Folge haben (z.B. *BCR-ABL1*-Mutationen bei der chronischen myeloischen Leukämie).

Schließlich liefern insbesondere molekulare Nachweisverfahren wichtige Informationen zum Therapieansprechen und zur Remissionstiefe nach eingeleiteter Behandlung. Für kurative Behandlungskonzepte ist etwa der persistierende Nachweis einer minimalen Resterkrankung (*minimal residual disease*, MRD) sehr bedeutungsvoll [15]. Mittlerweile konnte jedoch auch überzeugend gezeigt werden, dass ein gutes Therapieansprechen jenseits der mikroskopischen Diagnostik bei nicht-kurablen Erkrankungen ebenfalls mit der zu erwartenden Remissionsdauer korreliert.

Die nachfolgenden Ausführungen sollen den Anwendern der verschiedenen diagnostischen Verfahren kurz die derzeit gültigen Standards darlegen [3, 17] und den behandelnden Kolleginnen und Kollegen die Möglichkeiten und Grenzen dieser Laborinformationen skizzieren [6, 7, 8].

3 Zytomorphologie

3.1 Indikationen

- Unklare Normabweichungen im maschinellen Blutbild
- Verdacht auf primäre Knochenmarkerkrankungen (Leukämien, Lymphome etc.)
- Remissionskontrollen hämatologischer Erkrankungen
- Verdacht auf neoplastische Infiltration nicht-hämatopoetischer Organe bzw. Kompartimente (Leptomeningealraum, Peritoneum usw.)

3.2 Methodischer Hintergrund

Die Zytomorphologie von peripherem Blut und Knochenmark ist eine schnelle und preiswerte Methode, um richtungsweisende diagnostische Informationen zu hämatologischen Erkrankungen zu erhalten [1]. Insbesondere im Lichte neuerer teurerer Verfahren kommt ihr eine besondere Rolle bei der Indikationsstellung für weitergehende Analysen im Rahmen einer wirtschaftlichen Stufendiagnostik zu. Ferner eignet sie sich als rasche orientierende Untersuchung von Punktionsmaterialien [5].

Die wichtigsten Kenndaten dieser Methode sind:

- Untersuchungsdauer: Die Untersuchungsdauer beträgt bei einer panoptischen Färbung ca. 15-30 Minuten. Bei Spezialfärbungen bzw. zytochemischen Färbungen richtet sich die Dauer der Untersuchung maßgeblich nach diesen. Letztlich kann die Zytomorphologie innerhalb eines Tages abgeschlossen werden. Dies ist sinnvoll, um rasch andere Methoden zielgerichtet einzusetzen.
- Vor- und Nachteile: Die Vorteile des Verfahrens bestehen in seiner praktisch ubiquitären Verfügbarkeit, raschen Durchführbarkeit und den geringen Kosten. Die hauptsächlichsten Nachteile bestehen in der geringen Sensitivität (ca. 1:100) und der hohen Erfahrungsabhängigkeit vom Untersucher.

3.3 Präanalytik

Als Untersuchungsmaterial eignen sich peripheres Blut, Knochenmarkaspirat sowie flüssige Punktionsmaterialien (Liquor, Aszites, Pleuraflüssigkeit u.a.). Für alle Materialien gilt, dass sie im rasch präparierten Nativzustand sehr gut zu bewerten sind. Sie können jedoch auch mit dem Antikoagulant Ethylendiamintetraacetat (EDTA) versetzt werden, was spätere Präparationen in vergleichbarer Qualität zulässt. EDTA-antikoaguliertes Material sollte innerhalb von 24 Stunden ausgestrichen und analysiert werden, dies gilt sowohl für das numerische Blutbild als auch für das Differenzialblutbild. Heparin ist als Antikoagulant für zytomorphologische Untersuchung wegen Artefaktbildungen nicht geeignet. Ausgestrichene Knochenmarkausstriche sollten vor dem Färben zumindest 30 min getrocknet haben. Das gilt unbedingt auch, wenn diese ungefärbt versendet werden sollen, bevor diese in den Versandcontainer verpackt werden.

Voraussetzung für eine aussagekräftige Untersuchung ist die Gewinnung von repräsentativem Material und eine fachgerechte Präparation. Bei allen Punktionsmaterialien muss daher sichergestellt sein, dass das zu untersuchende Kompartiment getroffen wurde. Aus diesem Grunde sollte direkt das erste Aspirat für die zytomorphologische Analytik gewonnen werden, damit es später einer visuellen Kontrolle im Mikroskop unterzogen werden kann.

Die Präparation des Materials kann unverzüglich am Nativmaterial oder später an antikoaguliertem Material (EDTA) erfolgen. Bei peripheren Blutaussstrichen ist darauf zu achten, dass ein

abnehmender Dickegradient auf dem Objektträger mit Ausbildung einer so genannten Ausstrichfahne entsteht. Knochenmarkpräparate werden unmittelbar nach Aspiration (innerhalb weniger Sekunden, da das Aspirat sehr schnell gerinnen kann) oder mit Vorlegen von EDTA in der Spritze bis zu einem Zeitfenster von 24 Stunden als Ausstrich- oder als sogenannte Quetschpräparate angefertigt. Hierbei ist darauf zu achten, dass genügend Knochenmarkbröckel auf die Objektträger gelangen. Bei frustraner Aspiration sollten versuchsweise Abrollpräparate von einer nativen Stanzbiopsie angefertigt werden. Prinzipiell ist es erstrebenswert, mindestens 5 Blut- und Knochenmarkpräparate zu erhalten. Andere Punktionsmaterialien sollten idealerweise rasch unpräpariert in das Labor gelangen, da sie dort häufig speziell aufgearbeitet werden (z.B. Zytozentrifugation). Im Zweifel ist Rücksprache mit dem beauftragten Labor zu halten.

3.4 Analytik

Die Präparate sollten mindestens 15 min lufttrocken, insbesondere auch vor einem eventuellen Versand. Obligat ist die Durchführung einer panoptischen Färbung (z.B. nach Pappenheim), welche eine gute Übersicht über die verschiedenen Zellfraktionen erlaubt. Alle weiteren Färbungen ergeben sich aus deren Bewertung, siehe [Tabelle 1](#):

Tabelle 1: Zytomorphologie - Färbungen

Färbung	Indikation
Pappenheim-Färbung (Giemsa- & May-Grünwald-Färbung)	Übersichtsfärbung
Alpha-Naphtylacetatesterase-Reaktion (EST)	Nachweis monozytär differenzierter Zellen
Berliner-Blau-Reaktion	Nachweis von extrazellulärem (Markbröckel) und intrazellulärem (z.B. Sideroblasten) Eisen
Brillantkresylblau	Nachweis der Substantia granulofilamentosa in Retikulozyten
Perjodsäure-Schiff-Reaktion (PAS)	Nachweis von glykogenhaltigen Zellen (z.B. bei Erythroleukämie)
Peroxidase-Reaktion (POX)	Nachweis granulozytär differenzierter Zellen
Saure Phosphatase (SP)	Charakterisierung neoplastischer lymphatischer Zellen (z.B. T-ALL)

Die Untersuchung der fertigen Präparate erfolgt an einem qualitativ hochwertigen Lichtmikroskop. Die Objektivausstattung sollte eine Übersichtsvergrößerung (10x oder 20x), eine mittlere Vergrößerung (40x oder 63x) sowie eine hochauflösende Vergrößerung (100x) beinhalten. Der Untersuchungsgang beginnt mit einer Orientierung über die Qualität des Materials und einer quantitativen Analyse der Zellverteilung. Hierzu werden im peripheren Blutausstrich mindestens 100 kernhaltige Zellen (Differenzialblutbild) sowie die Erythrozytenmorphologie bewertet. Im Knochenmark werden mindestens 200 kernhaltige Zellen (Myelogramm) kategorisiert. Abweichungen hiervon, z.B. bei ausgeprägter hämatopoetischer Hypoplasie, sind zu dokumentieren. Mit Ausnahme des Liquors erfolgt die Analyse anderer Punktionsmaterialien nicht nach einem festgelegten Prinzip, sondern richtet sich in erster Linie nach der Fragestellung.

Neben der quantitativen Analyse sollte eine möglichst genaue Beschreibung normabweichender qualitativer Zellmerkmale erfolgen. Auch Ausschlussfeststellungen (z.B. kein Nachweis knochenmarkfremder Zellen) können für die abschließende Beurteilung hilfreich sein. Letztere sollte so konkret wie möglich formuliert werden und kann auch Verweise auf komplementäre diagnostische Methoden enthalten.

3.4.1 Peripheres Blut (Differenzialblutbild)

Die Klassifikation der kernhaltigen Zellen erfolgt mindestens in die folgenden Kategorien (mit exemplarischen Normbereichen), siehe [Tabelle 2](#):

Tabelle 2: Zytomorphologie - Klassifikation und Verteilung kernhaltiger Zellen im peripheren Blut

	Normbereich	Dimension
Stabkernige neutrophile Granulozyten	3-5	%
Segmentkernige neutrophile Granulozyten	40-70	%
Eosinophile Granulozyten	2-4	%
Basophile Granulozyten	0-1	%
Monozyten	3-7	%
Lymphozyten	20-40	%

Nötigenfalls (z.B. reaktive oder pathologische Linksverschiebung) können folgende Kategorien hinzugefügt werden: Blasten, Promyelozyten, Myelozyten und Metamyelozyten. Weitere hämatopoetische Zellen wie z.B. Erythroblasten, Plasmazellen usw. werden separat quantifiziert.

Sogenannte Kernschatten sind der Lymphozytenfraktion zuzurechnen, können im Befundkommentar jedoch auch quantitativ (% der Leukozyten) oder semiquantitativ angegeben werden: wenige (+), einige (++) oder viele (+++)].

Feststellungen zur Lymphozytenmorphologie (Reizformen, aktivierte Lymphozyten, LGL-Zellen, Mantelzellen usw.) sind in der Regel wertender Natur und sollten daher im Befundkommentar getroffen werden. Versierte Untersucher können gemäß der Empfehlungen der DGHO eine Einteilung in „typischer Lymphozyt“, „atypischer Lymphozyt, vermutlich reaktiv“ und „atypischer Lymphozyt, vermutlich neoplastisch“ vornehmen, und eine quantitative (% der Leukozyten) Aussage hierzu treffen [2].

Weitere qualitative Veränderungen der Leukozyten (z.B. toxische Granulationen, Pseudo-Pelger-Formen), Erythrozyten (z.B. Anisozytose, Poikilozytose, Polychromasie, Ruleaux-Formationen) oder Thrombozyten (z.B. Riesenthrombozyten) können ebenfalls semiquantitativ durch eine Einteilung in leicht (+), mittel (++) oder stark (+++) angegeben werden.

Der Anteil an Fragmentozyten wird in Prozent (%) oder Promille (‰) der Erythrozyten angegeben [4]. Zur Ermittlung des Wertes sind mindestens 5 Gesichtsfelder einer 100er-Objektivvergrößerung (entspricht ca. 200 Erythrozyten/Gesichtsfeld) auszuzählen.

3.4.2 Knochenmark

Die Beurteilung der Knochenmarkpräparate sollte ebenfalls zunächst eine Aussage über den Zellgehalt beinhalten, sodann eine Quantifizierung der kernhaltigen Zellen (Myelogramm), die mindestens die folgenden Kategorien enthält (mit exemplarischen Normbereichen), siehe [Tabelle 3](#):

Tabelle 3: Zytomorphologie - Klassifikation und Verteilung kernhaltiger Zellen im Knochenmark

	Normbereich	Dimension
Myeloblasten	0-3	%
Promyelozyten	2-5	%
Myelozyten	8-17	%
Metamyelozyten	10-25	%
Stabkernige neutrophile Granulozyten	8-20	%
Segmentkernige neutrophile Granulozyten	8-16	%
Eosinophile Granulozyten	2-6	%
Basophile Granulozyten	0-1	%
Monozyten	0-3	%
Proerythroblasten	0-2	%
Basophile Erythroblasten	1-4	%
Polychromatische Erythroblasten	12-24	%
Orthochromatische Erythroblasten	2-24	%
Lymphozyten	10-20	%
Plasmazellen	0-3	%
Megakaryozyten	0-1	%

Hilfreich ist zudem eine Bezifferung des Verhältnisses zwischen Granulozyto- und Erythrozytopoese (G:E-Verhältnis). Alle weiteren qualitativen Feststellungen erfolgen im Befundtext. Bei MDS und AML sind die prozentualen Anteile der Dysplasien in der Granulopoese, Erythropoese und Megakaryopoese anzugeben. Es ist dabei zu beachten, dass man in der jeweiligen Reihe bei MDS von „Dysplasie“ spricht, wenn $\geq 10\%$ der jeweiligen kernhaltigen Zellen einer Reihe dysplastische Veränderungen aufweisen; bei der AML ist dies erst bei $\geq 50\%$ der Zellen als Dysplasie zu bewerten. Die morphologischen Kriterien von „Dysplasie“ sind u.a. auch in den Kapiteln MDS und AML mit Multilinien-Dysplasie in der WHO Klassifikation von 2017 aufgeführt.

3.5 Qualitätsstandards

Die quantitative Analyse (Zelldifferenzierung) und qualitative (z.B. Dysplasie, Erythrozytenmorphologie) kann durch eine versierte und ärztlich autorisierte Laborfachkraft erfolgen. Eine wertende Analyse (Befundinterpretation) muss durch einen Facharzt für Innere Medizin mit der Schwerpunktbezeichnung Hämatologie und Internistische Onkologie, einen Facharzt für Pathologie oder einen Facharzt für Laboratoriumsmedizin erfolgen. Der Befund muss die Unterschrift oder eine validierte elektronische Signatur eines Arztes tragen. Die regelmäßige Teilnahme an externen Qualitätskontrollen (Ringversuchen) ist erforderlich, eine Zertifizierung/Akkreditierung des Labors nach ISO 15189 ist wünschenswert.

4 Durchflusszytometrie

4.1 Indikationen

- Unklare Normabweichungen im maschinellen oder mikroskopischen Blutbild [14]
- Verdacht auf primäre Knochenmarkerkrankungen (Leukämien, Lymphome etc.)

- Remissionskontrollen hämatologischer Erkrankungen bzw.
- Nachweis einer minimalen Resterkrankung (MRD)
- Verdacht auf neoplastische Infiltration nicht-hämatopoetischer Kompartimente (Liquorraum, Peritoneum, Pleurahöhle etc.)
- Verdacht auf andere klonale hämatopoetische Erkrankungen (z.B. PNH)
- Verdacht auf zellulären Immundefekt (z.B. HIV, COVID)
- Lymphozytentypisierung aus broncho-alveolärer Lavage (BAL)

4.2 Methodischer Hintergrund

Die durchflusszytometrische Charakterisierung von Leukozyten ist eine wichtige Technik zur Messung physiologischer Zellpopulationen (z.B. Quantifizierung von CD4-positiven Helferzellen) sowie zur diagnostischen Einordnung von lymphatischen Neoplasien [12]. Aber auch zum Nachweis von myeloischen Zellen mit normalem oder pathologischen Granulations- oder Antigenexpressionsmuster ist dieses Verfahren etabliert. Ferner können auch Veränderungen erythrozytärer Zellen (z.B. paroxysmale Hämoglobinurie, Sphärozytose) detektiert werden.

Die wichtigsten Kenndaten dieser Methode sind:

- Untersuchungsdauer: Die Untersuchungsdauer beträgt bei einer Standardmessung ca. 60 Minuten. Bei speziellen Anwendungen kann sie darüber liegen.
- Vor- und Nachteile: Die Vorteile des Verfahrens bestehen in seiner raschen Durchführbarkeit, seiner guten Reproduzierbarkeit sowie seiner höheren Sensitivität von bis zu $1:10^5$. Der hauptsächliche Nachteil besteht in der eingeschränkten Verfügbarkeit und ihren Kosten für Geräte und Antikörper, welche auf den notwendigen Technologiegrad zurückzuführen ist. Gerade auch durch die zunehmende Anwendung bei MDS und insbesondere MRD bei AML, ALL und Lymphomen ist eine gute technologische Ausstattung (Anzahl Farben) und eine große Expertise der Befunder zu fordern.

4.3 Präanalytik

Als Untersuchungsmaterial eignen sich sämtliche antikoagulierten und nativen Flüssigmaterialien. Der Transport erfolgt bei Raumtemperatur. Das Intervall zwischen Materialgewinnung und Analyse sollte bei antikoagulierten Materialien im Regelfall 48h nicht übersteigen, Nativflüssigkeiten (z.B. Liquor etc.) sollten innerhalb von 6h nach Entnahme untersucht werden. Spezielle Transportröhrchen für Liquor sollten erwogen werden.

4.4 Analytik

Die Aufarbeitung der Materialien erfolgt nach Standardprozeduren. Im Mittelpunkt steht dabei die Inkubation der Zellsuspension mit fluoreszenzmarkierten Antikörpern oder sonstigen Fluoreszenzfarbstoffen. Die Spezifität wird durch den verwendeten Antikörper oder den freien Farbstoff determiniert.

Bezüglich der zu untersuchenden Antigene oder Zielstrukturen existieren größtenteils Empfehlungen. Beispielhaft sei hier auf die Empfehlungen des European LeukemiaNet [15] und des EuroFlow-Konsortiums [12] verwiesen.

4.5 Qualitätsstandards

Die Durchführung der Analyse kann durch eine versierte und ärztlich autorisierte Laborfachkraft erfolgen. Wichtig ist, dass die Generierung der Quelldaten hochgradig von den Instrumenteneinstellungen abhängig ist und ein hohes Maß an gerätespezifischer Expertise erfordert. Aus diesem Grunde muss eine tägliche interne Qualitätskontrolle und ggf. Anpassung der Fluoreszenzkalibrierung erfolgen.

Die Befundinterpretation ist ebenfalls sehr stark von der zuvor durchgeführten Datenakquisition (sog. Gating) abhängig und muss durch einen Facharzt für Innere Medizin mit der Schwerpunktbezeichnung Hämatologie und Internistische Onkologie, einen Facharzt für Pathologie oder einen Facharzt für Laboratoriumsmedizin erfolgen. Der Befund muss die Unterschrift oder eine validierte elektronische Signatur eines Arztes tragen. Die regelmäßige Teilnahme an externen Qualitätskontrollen (Ringversuchen) ist erforderlich, eine Zertifizierung/Akkreditierung des Labors ist wünschenswert.

5 Zytogenetik

5.1 Indikationen

- Nachweis oder Ausschluss hämatologischer Erkrankung mit bekannten rekurrenten Chromosomenanomalien
- Diagnose und Klassifikation von Erkrankungen mit spezifischen zytogenetischen Veränderungen
- Erhebung von Prognoseparametern bei Myelodysplasien, Leukämien und Lymphomen
- Remissionskontrollen hämatologischer Erkrankungen

5.2 Methodischer Hintergrund

Zytogenetische Untersuchungstechniken sind bei der Diagnostik und Prognostik hämatologischer Erkrankungen fest etabliert. Viele zytogenetische Aberrationen haben laut der aktuellen WHO-Klassifikation entitätsdefinierenden Charakter oder dienen als wichtiger Leitbefund [16]. Darüber hinaus kann die Zytogenetik entscheidende prognostische Informationen liefern. Generell wird eine Analyse des vollständigen Chromosomensatzes an Metaphasen (Standard 20 Karyogramme) von der Untersuchung einzelner Loci per Fluoreszenz-in-situ-Hybridisierung (FISH), welche in der Regel an Interphasen durchgeführt wird, unterschieden. Während der Karyotyp umfassend Auskunft über strukturelle (z.B. Translokationen) und numerische (Aneuploidie) Anomalien geben kann, ist diese Methode relativ wenig sensitiv (ca. 1:25-50). FISH-Untersuchungen liefern dagegen nur Informationen zum untersuchten Chromosomlocus, sind in der Regel jedoch etwas sensitiver (ca. 1:200-500).

Die wichtigsten Kenndaten dieser Methode sind:

- Untersuchungsdauer: Die Untersuchungsdauer beträgt bei einer klassischen Chromosomenanalyse 5-15 Tage. FISH-Analysen können innerhalb von 1-2 Tagen erfolgen oder aber im Rahmen von dringlichen Direktpräparationen innerhalb weniger Stunden.
- Vor- und Nachteile: Die Vorteile des Verfahrens bestehen aus seinem sehr gut gesicherten diagnostischen und prognostischen Stellenwert. Die Nachteile bestehen aus der Notwendigkeit viabler maligner Zellen für die Kulturen beim Eintreffen im Labor, verhältnismäßig langen Untersuchungsdauer, der geringen Sensitivität (1:20 bis 1:500) und der sehr starken Erfahrungsabhängigkeit.

5.3 Präanalytik

Da die klassische Chromosomenanalyse als Ausgangsmaterial lebende Zellen benötigt, kommt dem richtigen Antikoagulant und einem raschen Probentransport hier besondere Bedeutung zu. Die Untersuchung ist prinzipiell nur an Heparin-antikoaguliertem Material möglich. Um die Absterberate der Zellen während des Transportes möglichst gering zu halten, sollten diese bei Raumtemperatur und innerhalb von 24 (-48) Stunden in das zytogenetische Labor kommen. Generell ist die Zytogenetik umso sicherer auswertbar, je kürzer die Transportzeiten sind. FISH-Analysen an Interphasekernen können zwar auch an EDTA-antikoaguliertem Material durchgeführt werden, aus Gründen der Flexibilität und Einfachheit empfiehlt es sich jedoch, diese aus demselben Material wie für die klassische Chromosomenanalyse durchzuführen. Die Materialabnahme muss in ein steriles Gefäß erfolgen. In der Regel sind 2-5 ml Knochenmark oder 10-20 ml Blut erforderlich, größere Mengen steigern die Sensitivität und Aussagekraft jedoch erheblich.

5.4 Analytik

Gemäß der aktuell gültigen WHO-Klassifikation ist eine Vielzahl von hämatologischen Erkrankungen über rekurrente chromosomale Anomalien definiert. Hierzu zählen u.a. (Auswahl), siehe [Tabelle 4](#):

Tabelle 4: Zytogenetik - krankheitsdefinierende chromosomale Anomalien

Läsion	Klinische Bedeutung
t(6;9) (p23;q34)	Nachweis oder Ausschluss einer zytogenetisch definierten akuten myeloischen Leukämie mit <i>DEK-NUP214</i> -Translokation
inv(16) (p13;q23)	Nachweis oder Ausschluss einer zytogenetisch definierten akuten myeloischen Leukämie mit <i>CBFB-MYH11</i> -Fusion
t(15;17) (q24;q21)	Nachweis oder Ausschluss einer zytogenetisch definierten Promyelozytneukämie mit <i>PML-RARA</i> -Translokation
t(1;22) (p13;q13)	Nachweis oder Ausschluss einer zytogenetisch definierten akuten myeloischen Leukämie mit <i>RBM15-MLK1</i> -Translokation
t(9;22) (q34;q11.2)	Nachweis oder Ausschluss einer chronischen myeloischen Leukämie (CML) oder einer Philadelphia-Chromosom-positiven (Ph ¹) akuten lymphatischen Leukämie (ALL) oder Ph ¹ akuten myeloischen Leukämie (AML)
alleinige del(5q)	Nachweis oder Ausschluss einer zytogenetisch definierten Myelodysplasie mit isolierter del(5q)
t(v;11)(v;q23)	Nachweis oder Ausschluss einer zytogenetisch definierten akuten Leukämie und rearrangierten <i>KMT2A</i> -Locus
t(1;19) (q23;p13.3)	Nachweis oder Ausschluss einer zytogenetisch definierten B-Linien ALL mit <i>E2A-PBX1</i> -Translokation
Hyper- oder Hypodiploidie	Nachweis oder Ausschluss einer zytogenetisch definierten B-Linien ALL mit Hyper- oder Hypodiploidie

Neben diesen entitätsdefinierenden Chromosomenveränderungen existieren zahlreiche zytogenetische Befunde, welche zusätzlich zu den übrigen Untersuchungen diagnostische Schlüsselinformationen für die Diagnosestellung liefern. Hierzu zählen u.a. (Auswahl), siehe [Tabelle 5](#):

Tabelle 5: Zytogenetik - weitere chromosomale Anomalien als Leitbefund

Läsion	Klinische Bedeutung
t(11;14)(q13;q32)	Leitbefund bei Mantelzell-Lymphom
t(14;18)(q32;q21)	Leitbefund bei Follikulärem Lymphom
t(8;14)(q24;q32)	Leitbefund bei Burkitt-Lymphom
inv(14)(q11q32) oder t(14;14)(q11;q32)	Leitbefund bei T-Prolymphozyten-Leukämie

Schließlich konnte in den vergangenen Jahren gezeigt werden, dass zytogenetische Befunde eine überragende Bedeutung bei der Prognostizierung hämatologischer Entitäten haben. Auf eine detaillierte Darstellung wird hier aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet.

5.5 Qualitätsstandards

Bei der Chromosomenanalyse wird angestrebt, mindestens 20 Metaphasen zu analysieren. Wird eine durchgehende klonale Aberration nachgewiesen, ist eine Untersuchung von zumindest 10 Metaphasen ausreichend. Bei der FISH-Analyse sollten mindestens 100 Interphasekerne untersucht werden. Die Ergebnisse der Chromosomenanalyse und der FISH-Analyse werden nach der aktuellen internationalen Nomenklatur (international system for human cytogenetic nomenclature, ISCN) [10] angegeben.

Die Durchführung der Analyse kann durch eine versierte und ärztlich autorisierte Laborfachkraft erfolgen. Die Kontrolle der erhobenen Chromosomenbefunde sowie die Befundinterpretation sollten durch eine(n) Fachhumangenetiker(in), eine(n) Facharzt/Fachärztin für Humangenetik oder eine vergleichbar qualifizierte Person erfolgen. Der Befund muss die Unterschrift oder eine validierte elektronische Signatur eines Arztes tragen. Die regelmäßige Teilnahme an externen Qualitätskontrollen (Ringversuchen) ist erforderlich, eine Zertifizierung/Akkreditierung des Labors wünschenswert.

6 Molekulargenetik

6.1 Indikationen

- Nachweis oder Ausschluss hämatologischer Erkrankung mit bekannten rekurrenten molekularen Aberrationen
- Erhebung von Prognoseparametern bei Myelodysplasien, Leukämien und Lymphomen
- Remissionskontrollen hämatologischer Erkrankungen, v.a. Nachweis einer minimalen Resterkrankung (MRD)
- Bestimmung des hämatopoetischen Chimärismus nach allogener Stammzelltransplantation

6.2 Methodischer Hintergrund

Molekulargenetische Untersuchungstechniken besitzen mittlerweile einen sehr gut etablierten Stellenwert bei der Diagnostik, Prognostik und Verlaufsbeobachtung hämatologischer Erkrankungen [13]. Zum einen basieren sie noch auf konventionellen Polymerasekettenreaktionen (PCR), andererseits werden zunehmend moderne genomische Verfahren eingesetzt, welche die simultane und quantitative Analyse einer großen Zahl von Genen bis hin zur vollständigen Untersuchung ganzer Genome, Exome, Transkriptome etc. erlauben (NGS = next generation sequencing). Auf Grund dieser enormen analytischen Bandbreite, muss die Indikation für die Bestimmung verschiedener Parameter sehr sorgfältig und aus der klinischen Fragestellung kombiniert möglichst mit Befunden aus der Zytomorphologie und Durchflusszytometrie gestellt werden.

Die wichtigsten Kenndaten dieser Methode sind:

- Untersuchungsdauer: Nach Vorbereitung der Probe beträgt die reine Untersuchungsdauer bei einer konventionellen PCR 2-4 Stunden. Verfahren, welche DNA-Sequenzierungen mit einschließen, können rein technisch 24h (kurze DNA-/RNA-Abschnitte) bis zwei Wochen (Genomanalysen) dauern. Der zusätzliche bioinformatische Aufwand der Auswertung muss hinzugerechnet werden und ist bei größerem Umfang der Daten nicht unerheblich.

- Vor- und Nachteile: Die Vorteile des Verfahrens bestehen in seiner unübertroffenen Spezifität und Sensitivität. Die hauptsächlichen Nachteile bestehen aus dem außerordentlich hohen Spezialisierungsgrad, bei den heute möglichen NGS-Ansätzen der notwendigen Zusammenarbeit von Bioinformatikern, Molekularbiologen und Ärzten und den Kosten.

6.3 Präanalytik

Als Untersuchungsmaterial eignet sich prinzipiell jede zellhaltige Körperflüssigkeit, insbesondere peripheres Blut, Knochenmarkaspirate und Punktate. Ethylendiamintetraacetat (EDTA) ist für gerinnbare Flüssigkeiten das Antikoagulant der Wahl, anderer Antikoagulantien wie Heparin können jedoch auch angewendet werden. Auf Grund der kurzen Halbwertszeit von Ribonukleinsäure (RNS) muss ein rascher Transport (innerhalb 24 (-48h)) bei Raumtemperatur in das Untersuchungslabor sichergestellt werden. Alternativ können Abnahmegefäße mit Stabilisatorzusätzen Verwendung finden, deren Einsatz ist jedoch noch nicht für alle nachfolgenden Methoden etabliert.

Während die gezielte Untersuchung pathogener somatischer (erworbener) Genaberrationen keinen besonderen Regularien unterliegt, bedürfen Keimbahnanalysen gemäß Gendiagnostikgesetz (GenDG) grundsätzlich der gesonderten Aufklärung und Zustimmung durch den Patienten.

6.4 Analytik

Viele molekulargenetische Nachweisverfahren basieren auf dem Prinzip der Polymerasekettenreaktion (PCR). Die hierbei entstehenden Amplifikate können durch elektrophoretische oder fluoreszenzgestützte Methoden direkt dargestellt werden. Letztere erlauben auch eine akkurate Quantifizierung im Ausgangsmaterial. Methodisch gibt es in der Molekulargenetik zwei Problemfelder: Falsch-negative Ergebnisse durch Nukleinsäuredegradation und falsch-positive Ergebnisse durch Kreuzkontamination. Um erstere zu reduzieren ist das stete Mitführen einer probenspezifischen Positivkontrolle (interne Kontrolle) obligat. Dies kann gleichzeitig als quantitative Referenz genutzt werden. Kreuzkontaminationen sollten durch eine strikte räumliche Trennung von präparativen und analytischen Schritten ausgeschlossen werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, Uracil-haltige kontaminierende Amplifikate durch einen Verdau mit Uracil-DNA-Glykosylase zu eliminieren.

In zunehmendem Maße kommen heute Sequenzierungstechniken zur Anwendung. Diese basieren z.T. noch auf dem Kettenabbruchprinzip nach Sanger. Prinzipiell ist eine doppelsträngige Sequenzierung zu bevorzugen, welche die Fehlerwahrscheinlichkeit des Verfahrens reduziert. Der Abgleich der ermittelten Nukleinsäuresequenz (heute Varianten genannt) mit öffentlichen Datenbanken erfordert spezielle Expertise, insbesondere, wenn sie variable Genregionen (z.B. Immunglobulin-Ketten) betrifft.

Eine neue Entwicklung innerhalb der Molekulargenetik ist die Anwendung von genomischen Hochdurchsatzverfahren, die die gleichzeitige (parallele) Sequenzierung einer Vielzahl von Genabschnitten oder Genen oder sogar des gesamten Genoms ermöglichen (NGS). Obwohl diese Verfahren wirtschaftlich immer erschwinglicher, methodisch immer einfacher und zeitlich immer schneller werden, handelt es sich bisher noch um eine Methodik, die eine hochkomplexe Datenanalyse nach sich zieht. Zudem ist der klinische Stellenwert speziell zur Prognose vieler neuer molekularer Aberrationen noch nicht geklärt, so dass eine wichtige Aufgabe für die nahe Zukunft sein wird, die diagnostische und prognostische Wertigkeit der einzelnen Aberrationen zu klären sowie die methodischen Voraussetzungen (z.B. Sensitivität) festzulegen. Ob die sog. Sanger-Sequenzierung (Sensitivität ca. 10-20%) oder das NGS (Sensitivität 2-5%) Anwendung findet, ist bisher dem jeweiligen Labor unter Berücksichtigung der üblichen Qualitätskontrollen,

Ringversuche und ggf. Akkreditierung zu überlassen. Das NGS hat dabei viele Vorteile wie z.B. auch die genaue Beschreibung der Tumorlast (variant allele frequency = VAF).

Die Zahl molekulargenetischer Läsionen, die eine diagnostische oder prognostische Bedeutung haben, nimmt stetig zu. Nicht alle sind jedoch bereits klinisch hinreichend validiert. Veränderungen mit gesichertem Stellenwert (Auswahl) sind in [Tabelle 6](#) zusammengefasst.

Tabelle 6: Molekularbiologie - Läsionen mit gesichertem Stellenwert

Läsion	Klinische Bedeutung
<i>BCR-ABL1</i>	Nachweis oder Ausschluss einer chronischen myeloischen Leukämie (CML) oder einer Philadelphia-Chromosom-positiven (Ph ¹) akuten lymphatischen Leukämie (ALL) oder auch Ph ¹ AML MRD-Nachweis
<i>JAK2</i> V617F-Mutation <i>JAK2</i> Exon 12-Mutationen <i>MPL</i> W515-Mutationen <i>CALR</i> -Mutationen	Nachweis oder Ausschluss myeloproliferativer Neoplasien
<i>RUNX1-RUNX1T1</i>	Nachweis oder Ausschluss einer zyto- bzw. molekulargenetisch definierten AML, MRD-Nachweis
<i>PML-RARA</i>	Nachweis oder Ausschluss einer zyto- bzw. molekulargenetisch definierten AML (akute Promyelozytenleukämie), MRD-Nachweis
<i>CBFB-MYH11</i>	Nachweis oder Ausschluss einer zyto- bzw. molekulargenetisch definierten AML, MRD-Nachweis
<i>NPM1</i> -Mutationen	Nachweis oder Ausschluss einer molekulargenetisch definierten AML (Entität nach WHO 2017) sowie Prognosefaktor
<i>CEBPA</i> -Mutation	Nachweis oder Ausschluss einer molekulargenetisch definierten AML (Entität nach WHO 2017) sowie Prognosefaktor, wenn doppel mutiert
<i>PDGFRA</i> / <i>PDGFRB</i> -Rearrangement	Nachweis oder Ausschluss einer entitätsdefinierenden klonalen Eosinophilie
<i>P53</i> -Mutationen (Exons 4-10)	Bei Nachweis Hochrisiko CLL

6.5 Qualitätsstandards

Die Durchführung der Analyse kann durch eine versierte und ärztlich autorisierte Laborfachkraft erfolgen. Die Kontrolle der erhobenen Befunde sowie die Befundinterpretation sollte durch eine(n) Fachhumangenetiker(in), eine(n) Facharzt/Fachärztin für Humangenetik oder eine vergleichbar qualifizierte Person (z.B. Molekularbiologen oder Molekularpathologen, ggf. mit Unterstützung durch Bioinformatiker) erfolgen. Der Befund muss die Unterschrift oder eine validierte elektronische Signatur eines Arztes tragen. Die regelmäßige Teilnahme an externen Qualitätskontrollen (Ringversuchen) ist erforderlich, eine Zertifizierung/Akkreditierung des Labors sehr wünschenswert.

7 Histopathologie (Knochenmark)

7.1 Indikationen

Wenn im Rahmen der Erstdiagnose einer hämatologischen Systemerkrankung die Untersuchung der Knochenmarkzytologie angestrebt wird, ist es generell empfehlenswert, auch eine Knochenmarkstanzbiopsie zu gewinnen, um ein möglichst vollständiges Bild einer Knochenmarkbeteiligung der Erkrankung zu gewinnen [11]. Spezielle Indikationen für die Gewinnung einer Knochenmarkshistologie sind (Auswahl):

- Ausmaß einer Knochenmarkinfiltration bei Leukämien, Lymphomen, MDS [9] und beim Multiplen Myelom im initialen Staging oder zur Beurteilung des Remissionsgrades nach Therapie sowie Bestimmung des Anteils der verbliebenen Resthämatopoese
- Diagnostik myeloproliferativer Knochenmarksneoplasien, speziell auch bei *Punctio sicca* (z.B. bei Primärer Myelofibrose, Haarzell-Leukämie, etc.)
- Infiltrate eines klassischen Hodgkin-Lymphoms
- Diagnostik fokaler Prozesse im Knochenmark (Metastasen solider Tumoren, Nachweis einer granulomatösen Erkrankung, etc.)

7.2 Methodischer Hintergrund

Histopathologische Untersuchungen des Knochenmarks, insbesondere aber auch von soliden Geweben, insbesondere von Lymphknoten, stellen nach wie vor bei vielen hämatologischen Entitäten, v.a. bei malignen Lymphomen, den diagnostischen Goldstandard dar. Das Verfahren ist langjährig etabliert und bei der Untersuchung solider Gewebe praktisch konkurrenzlos. Ergänzt wird es heutzutage durch immunhistochemische und molekularpathologische Techniken. Als einziges der hier aufgeführten Verfahren erlaubt es Feststellungen im geweblichen Kontext. Viele Entitäten sind in der derzeit gültigen WHO-Klassifikation sehr detailliert charakterisiert und allgemeingültig definiert.

Die wichtigsten Kenndaten dieser Methode sind:

- Untersuchungsdauer: Die Untersuchungsdauer variiert in Abhängigkeit von Material und Fragestellung zwischen wenigen Stunden (sog. Schnellschnitt) und mehreren Tagen (z.B. komplexe immunhistochemische und molekulare Untersuchungen an Knochenmark und Lymphknoten).
- Vor- und Nachteile: Die Vorteile des Verfahrens bestehen in seiner langjährigen Etablierung und insbesondere der sehr guten Spezifität. Die hauptsächlichsten Nachteile bestehen aus der hohen Erfahrungsabhängigkeit sowie der hieraus resultierenden sehr beschränkten Standardisierungsmöglichkeit.

7.3 Präanalytik

Voraussetzung für eine aussagekräftige histologische Untersuchung einer Knochenmarkstanze ist die Gewinnung von repräsentativem Material. Die Gewinnung des Stanzzylinders erfolgt in der Regel im Bereich der Spina iliaca posterior superior, die Länge des Stanzzylinders sollte mindestens 1,0 cm, wenn möglich aber 2,0 cm betragen. Mit der Übersendung der Knochenmarksstanze an ein Institut für Pathologie sollten auch alle relevanten klinischen Angaben (Blutbild, Knochenmarkszytologie, Vorerkrankungen, etc.) und insbesondere eine klinische Fragestellung übermittelt werden. Zur Fixierung wird üblicherweise neutral-gepuffertes Formalin verwendet, in der Pathologie folgt dann eine Paraffineinbettung, die zunächst eine Entkalkungsprozedur erforderlich macht. Diese Aufarbeitung führt, beispielsweise im Gegensatz zu einer Einbettung in Kunstharze, zu einer weitgehenden Erhaltung der Oberflächenantigene der Knochenmarkszellen, die für häufige immunhistochemische Fragestellungen wichtig ist.

7.4 Analytik

Obligat an Knochenmarksstanzbiopsaten ist die Durchführung einer Hämatoxylin-Eosin (HE-) Färbung, ggf. auch einer Giemsa-Färbung, welche eine gute Übersicht über die verschiedenen Zellpopulationen im Knochenmark erlauben. Die Untersuchung erfolgt an einem qualitativ hochwertigen Lichtmikroskop durch eine(n) Arzt/Ärztin für Pathologie, der/die spezielle Erfahrung in der hämatopathologischen Diagnostik aufweist. Der Knochenmarksbefund sollte Anga-

ben zur Zellularität, zur topographischen Verteilung der zellulären Elemente sowie Einschätzungen zur Zellmorphologie erhalten und natürlich pathologische Veränderungen/Infiltrate beschreiben. Für viele Fragestellungen (z.B. Subklassifikation eines Lymphominfiltrates) sind immunhistochemische Untersuchungen erforderlich, gelegentlich müssen molekulare Untersuchungen (z.B. Klonalitätsanalysen bei der Frage einer diskreten Knochenmarksinfiltration durch ein Lymphom) durchgeführt werden.

7.5 Qualitätsstandards

Die Durchführung der Präanalytik kann durch eine versierte und ärztlich autorisierte Laborfachkraft erfolgen. Die Befunderhebung sowie die Befundinterpretation müssen durch einen Facharzt für Pathologie erfolgen. Der Befund muss die Unterschrift oder eine validierte elektronische Signatur eines Arztes tragen. Die regelmäßige Teilnahme an externen Qualitätskontrollen (Ringversuchen) ist erforderlich, eine Zertifizierung/Akkreditierung des Labors wünschenswert.

9 Literatur

1. Bain JB, Kreuzer KA: Das Blutbild (Übersetzung von: Blood cells: A practical guide (5. Aufl.)). de Gruyter, Berlin 2017
2. Baurmann H, Bettelheim P, Diem H et al.: Lymphozytenmorphologie im Blutausschlag - Vorstellung einer überarbeiteten Nomenklatur und Systematik. Lab Med 35: 261-270, 2011. DOI:10.1515/JLM.2011.037
3. Bundesärztekammer. Richtlinie der Bundesärztekammer zur Qualitätssicherung laboratoriumsmedizinischer Untersuchungen. Dt Ärzteblatt 39: A1822, 2013.
4. Deutsche Gesellschaft für Hämatologie und Medizinische Onkologie. Definition Fragmentozyten im peripheren Blut (09/2003): https://www.dgho.de/arbeitskreise/l-o/laboratorium/fragmentozyten-im-peripheren-blut/Definition_Fragmentozyten.pdf
5. Haferlach T, Bacher U, Thiel H et al. Taschenatlas Hämatologie (6. Aufl.). Thieme-Verlag, Stuttgart 2012
6. Kreuzer KA, Beyer J. Hämatologie und Onkologie. Thieme-Verlag, Stuttgart 2016
7. Kreuzer KA. Referenz Hämatologie. Thieme-Verlag, Stuttgart 2018
8. Löffler H, Haferlach T. Hämatologische Erkrankungen (2. Aufl.). Springer-Verlag, Heidelberg 2012
9. Malcovati L, Hellström-Lindberg E, Bowen D et al. European Leukemia Net. Diagnosis and treatment of primary myelodysplastic syndromes in adults: recommendations from the European LeukemiaNet. Blood 122:2943-2964, 2013. DOI:10.1182/blood-2013-03-492884
10. McGowan-Jordan J, Simons A, Schmid M. ISCN 2016. Karger-Verlag, Basel 2016
11. Naeim F, Rao PN, Grody WW. Hematopathology (1. Aufl.), Elsevier London, 2008
12. Ortolani C. Flow cytometry of hematological malignancies (1. Aufl.). John Wiley & Sons, Chichester, 2011
13. Provan D, Gibben J. Molecular Hematology (2. Aufl.). Blackwell Publishing Oxford, 2005
14. Sack U, Tarnok A, Rothe G. Zelluläre Diagnostik: Grundlagen, Methoden und klinische Anwendungen der Durchflusszytometrie. Karger-Verlag, Basel, 2007
15. Schuurhuis GJ, Heuser M, Freeman S et al. Minimal/measurable residual disease in AML: consensus document from ELN MRD Working Party. Blood. 2018 Jan pii: blood-2017-09-801498. DOI:10.1182/blood-2017-09-801498

16. Swerdlow SH, Campo E, Harris NL et al. WHO classification of tumours of haematopoietic and lymphoid tissues (4. rev. Aufl.). WHO Press, Geneva, 2017
17. Thomas L. Labor und Diagnose (8. Aufl.). TH-Books Verlagsgesellschaft Frankfurt/Main, 2012

15 Anschriften der Experten

Prof. Dr. med. Karl-Anton Kreuzer

Klinikum der Universität zu Köln
Klink I für Innere Medizin
Kerpener Str. 62
50937 Köln
karl-anton.kreuzer@uni-koeln.de

Prof. Dr. Peter Bettelheim

Krankenhaus der Elisabethinen Linz
Abteilung für Hämatologie,
internistische Onkologie
und Stammzelltransplantation
Fadingerstr. 1
A-4020 Linz
peter@bettelheim.eu

Prof. Dr. med. Dr. phil. Torsten Haferlach

MLL Münchner Leukämielabor GmbH
Max-Lebsche-Platz 31
81377 München
torsten.haferlach@mll.com

Prof. Dr. med. Andreas Rosenwald

Universitätsklinikum Würzburg
Institut für Pathologie
Joseph-Schneider-Str. 2
97080 Würzburg
rosenwald@uni-wuerzburg.de

16 Erklärung zu möglichen Interessenkonflikten

nach den Regeln der DGHO Deutsche Gesellschaft für Hämatologie und Medizinische Onkologie und den Empfehlungen der AWMF (Version vom 23. April 2010) und internationalen Empfehlungen